

ÉCOLE DOCTORALE Arts et Métiers**Laboratoire de Géodésie et de Géomatique****THÈSE**

présentée par :

Mohamed Ayet Allah Bilel Soussi

Soutenue le : 15 février 2013

pour obtenir le grade de : **Docteur du Conservatoire National des Arts et Métiers**Discipline/ Spécialité : **Géomatique****Conception et réalisation d'un système d'information pour le
calcul d'itinéraires destiné aux services d'urgence****THÈSE dirigée par :****M Laurent POLIDORI** Professeur titulaire de la Chaire de Géomatique, CNAM-ESGT – Laboratoire L2G
M Jean-Michel FOLLIN Maître de conférences, CNAM-ESGT – Laboratoire L2G**RAPPORTEURS :****Mme Karine ZEITOUNI** Professeur des Universités, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines
Laboratoire PRISM
Mme Anne RUAS Ingénieur en Chef des Ponts, des Eaux et Forêts - IFSTTAR, Laboratoire MACS**EXAMINATEURS :****M Guillaume MOREAU** Professeur des Universités, Ecole Centrale de Nantes – Laboratoire CERMA
M Alain BOUJU Maître de conférences HDR. Université La Rochelle – Labo. L3I**MEMBRE INVITE :****M Ludovic STEEN** SAMU 72, Responsable de l'unité fonctionnelle Médecine de Catastrophe

Remerciements

Tout d'abord, j'aimerais exprimer toute ma reconnaissance au Dr Jean-Michel Follin, qui a encadré ce travail de thèse avec de grandes qualités scientifiques et humaines, ainsi qu'au Pr Laurent Polidori, mon directeur de thèse qui a toujours été disponible malgré ses lourdes charges administratives. Merci pour vos conseils et votre soutien.

Je tiens à remercier tous les membres du jury qui se sont intéressés à ce travail, en particulier Dr Anne Ruas et Pr Karine Zeitouni qui ont accepté la charge de rapporteurs. Merci aussi pour le Pr Guillaume Moreau et Dr Alain Bouju d'avoir examiné mon travail.

Merci également à tous les doctorants du bureau 246 : Benoit Legru, Mhamed el Hage, Maryam Souheili, Marcell Feren et André Olavo Leite que j'ai côtoyés pendant ces trois ans. Merci pour la bonne humeur et pour nos discussions scientifiques enrichissantes.

J'ai aussi une petite pensée pour toute l'équipe du laboratoire L2G : Laurent, Stéphane, Jérôme, José, Joëlle et Elisabeth pour m'avoir permis de travailler dans un cadre agréable.

Un grand merci à ma famille, qui m'a encouragé tout le long de mon parcours scolaire et universitaire. Je suis également très reconnaissant envers mes cousins Jamel et Karim pour leurs encouragements durant la réalisation de ce travail.

Enfin, MERCI à toi, Sameh, pour ta patience et ton soutien.

Résumé

De nos jours, la problématique de recherche du meilleur itinéraire est très étudiée dans diverses applications telles que pour le mode de transport doux (vélo) ou piétonnier, pour l'interception d'un objet mobile ou encore pour la combinaison des modes de transport (multimodal).

Dans cette optique, notre objectif consiste à chercher un meilleur itinéraire pour les services d'urgence. Notre étude est réalisée en partenariat avec le SMUR du Mans (Sarthe) qui fournit le contexte opérationnel.

Dans un premier temps, ce travail de recherche consiste à exploiter l'historique des trajectoires empruntées par le service d'urgence pour avoir une meilleure estimation du temps de parcours. Afin de réaliser cette tâche, nous proposons une méthodologie partant de la phase de la modélisation des objets mobiles passant par une étape d'analyse statistique et de data mining et allant jusqu'aux phases de l'implémentation et de la validation. Concernant la phase de la modélisation, nous proposons une approche qui fait le lien entre une modélisation et une gestion des objets mobiles par des Types Abstraits de Données (TAD) et une modélisation conceptuelle basée sur MADS. En vue d'avoir une meilleure estimation du temps de parcours, une méthode d'Analyse des Correspondances Multiples et une technique de création d'arbres et de règles de décision sont utilisées. Pour le processus de la validation de notre méthode d'estimation du temps de parcours, nous procédons par une comparaison entre les itinéraires proposés par application d'un algorithme de recherche du plus court chemin et les trajectoires empruntées par le service d'urgence.

Dans un deuxième temps, et pour pouvoir prendre en considération la temporalité et l'incertitude sur les estimations du temps de parcours causées par les différents types de perturbations, le mode dépendant du temps avec graphe par intervalle et la notion de degré d'optimisme seront retenus pour l'implémentation de notre calculateur. On propose deux versions de recherche d'itinéraires : un seul et unique chemin le plus rapide et les k premiers chemins optimaux. Afin de minimiser le risque de blocage, la deuxième version sera bénéfique dans le cas où deux équipes partent pour une même intervention. Chacune d'entre elles empruntera un chemin différent afin d'optimiser les chances d'arriver rapidement sur les lieux d'intervention.

Enfin, et pour prendre en considération en temps réel les événements exceptionnels prévus (manifestations, travaux publics), les changements des caractéristiques physiques du réseau routier, les conditions météorologiques et les événements imprévus (embouteillages, accidents) qui peuvent influencer sur le choix d'itinéraires, nous proposons un système d'aide à la prise en compte des perturbations du trafic en temps réel.

Mots-clés : service d'urgence, trajectoires, estimation de vitesses de parcours, calcul d'itinéraires, temps réel, système d'information.

Abstract

The present-day issue of looking for the most appropriate route is widely studied for various applications such as cycling or pedestrians, the interception of a mobile object, multimodal or combining means of transport.

With this approach, our objective is to search for the best itinerary for emergency vehicles. Our study has been carried out in partnership with the SMUR (emergency medical assistance) in Le Mans, which has provided an operational context.

Our research work firstly dealt with the records of the routes used by emergency vehicles so as to obtain a more accurate estimation of journey times. For this task, our methodology begins with a phase of modelising mobile objects using statistical analysis and data mining to reach phases of implementation and validation. During the modelisation phase, we propose the use of an approach that creates a link between modeling and management of mobile objects by Abstract Data Types (TAD) and conceptual modeling based on MADS. So as to improve estimation of journey time a method of Multiple Correspondence Analysis and a technique for creating trees and decision rules were used. For the validation process of journey time, we compared routes suggested by a research algorithm application for the shortest trip and the routes used by the emergency services.

Secondly, so as to take into consideration time value and the uncertainty of journey time estimations due to disturbances, the mode depending on time with graph per interval and the notion of degree of optimism will be retained for the implementation of our calculator. We propose two versions of itinerary research: a single unique fastest route and the first k optimal routes. So as to minimize the risk of blocking, a second version is of benefit in the case of two emergency units leaving for the same intervention. Each will use a different route to maximize the chances of arriving on the scene quickly Intervention.

The ultimate stage involved considering in real time the consequences of exceptional foreseen events (demonstrations, roadworks), changes in the physical characteristics of the road network, weather conditions and those that could not be predicted (traffic congestion and accidents) that can influence the choice of a route, for which we propose a system to help in the management of such a disturbance in real time.

Keywords : emergency medical assistance, trajectory, traveling speed estimation, itinerary calculation, real time, information system.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION..... | 18 |
| ELEMENTS DE CONTEXTE | 18 |
| OBJECTIFS DE LA THESE | 19 |
| ORGANISATION DU MANUSCRIT..... | 21 |
| CHAPITRE 1 AMELIORATION DE L’EFFICACITE DES SERVICES D’INTERVENTIONS ET CONTEXTE OPERATIONNEL..... | 23 |
| INTRODUCTION..... | 23 |
| 1.1 PRESENTATION GENERALE DU SYSTEME D’URGENCE EN FRANCE..... | 23 |
| 1.1.1 Les urgences pré-hospitalières | 24 |
| 1.1.1.1 Les acteurs..... | 24 |
| 1.1.1.2 Cycle de vie de prise en charge d’un patient par le SAMU/SMUR..... | 26 |
| 1.1.2 Etat de l’art sur l’amélioration du processus de prise en compte des patients en situation d’urgence | 26 |
| 1.1.2.1 La localisation des incidents | 27 |
| 1.1.2.2 Le positionnement, l’affectation et le redéploiement des véhicules d’urgences | 28 |
| 1.1.2.3 Optimisation du positionnement des véhicules d’urgences | 29 |
| 1.1.2.4 Optimisation d’affectation et redéploiement des véhicules d’urgences..... | 29 |
| 1.1.2.5 L’envoi des véhicules d’urgence et la recherche du meilleur itinéraire..... | 30 |
| 1.1.2.6 Performance et outils de simulation de la gestion de prise en compte des patients par les services d’urgence | 30 |
| 1.2 ETUDE DE L’EXISTANT ET CONTEXTE OPERATIONNEL..... | 31 |
| CONCLUSION..... | 31 |
| CHAPITRE 2 MODELISATION ET GESTION DES DONNEES SPATIO- TEMPORELLES POUR L’ESTIMATION DU TEMPS DE PARCOURS..... | 33 |
| INTRODUCTION..... | 33 |
| 2.1 ETAT DE L’ART DES TECHNIQUES DE MESURES DU TEMPS DE PARCOURS | 33 |
| 2.1.1 Le temps de parcours : notion générale et typologie..... | 33 |
| 2.1.2 Techniques et exigences pour la mesure du temps de parcours | 34 |
| 2.1.2.1 Par suivi de véhicules | 35 |

| | |
|---|----|
| 2.1.2.2 Basées sur des capteurs fixes | 36 |
| 2.1.2.3 Par fusion des données | 37 |
| 2.2 DISCUSSION ET CHOIX D'UNE TECHNIQUE D'ESTIMATION DU TEMPS DE PARCOURS | 38 |
| 2.3 ETAT DE L'ART SUR LA MODELISATION ET LA GESTION DES OBJETS MOBILES | 39 |
| 2.3.1 La modélisation des données spatio-temporelles par TAD | 39 |
| 2.3.1.1 Modèle libre | 39 |
| 2.3.1.2 Modèle contraint | 41 |
| 2.3.2 La modélisation des données spatio-temporelles par modèles conceptuels..... | 44 |
| 2.3.2.1 Les approches entité-association | 45 |
| 2.3.2.2 Les approches orientées objet | 48 |
| 2.3.3 Etudes sur les SGBDR spatiaux temporels | 50 |
| CONCLUSION | 53 |

**CHAPITRE 3 UNE DEMARCHE POUR ENRICHIR UNE BASE DE DONNEES
ROUTIERE PAR DES ESTIMATIONS DE VITESSES DE PARCOURS..... 54**

| | |
|---|----|
| INTRODUCTION..... | 54 |
| 3.1 QUESTIONS ET REFLEXIONS | 54 |
| 3.2 UN MODELE LIBRE MODIFIE POUR LES TRAJECTOIRES DES INTERVENTIONS | 54 |
| 3.3 APPARIEMENT DES DONNEES GEOGRAPHIQUES..... | 56 |
| 3.3.1 Définition générale et domaines d'utilisation du processus d'appariement..... | 56 |
| 3.3.2 Le map-matching, un cas particulier d'appariement..... | 58 |
| 3.3.2.1 Présentation des techniques du map-matching..... | 58 |
| 3.3.2.2 Mesures utilisées dans le processus du map-matching | 61 |
| 3.3.2.3 Discussions et choix de la méthode du map-matching..... | 62 |
| 3.4 STRATEGIE D'ENRICHISSEMENT DE LA BASE DE DONNEES ROUTIERE..... | 64 |
| 3.4.1 Enrichissement par méthode directe..... | 68 |
| 3.4.2 Enrichissement par méthode indirecte | 68 |
| 3.5 APPROCHE POUR L'ESTIMATION DE VITESSES DE PARCOURS..... | 70 |
| 3.5.1 Extraction et enrichissement par types abstraits | 70 |
| 3.5.2 Enrichissement par le biais d'un modèle conceptuel | 74 |
| 3.5.2.1 Exigences pour la modélisation conceptuelle de la base de données des trajectoires | 74 |
| 3.5.2.2 Choix du modèle et SGBD approprié | 75 |
| 3.5.2.2.1 Choix du modèle | 75 |

| | |
|---|------------|
| 3.5.2.2.2 Choix du SGBD approprié | 76 |
| 3.5.2.2 Implémentation du schéma conceptuel | 76 |
| CONCLUSION | 81 |
| CHAPITRE 4 PREDICTION DE VITESSES DE PARCOURS ET METHODE DE | |
| VALIDATION..... | 82 |
| INTRODUCTION..... | 82 |
| 4.1 METHODE D'ANALYSE ET DE CLASSIFICATION DES TRONÇONS ROUTIERS : L'EXEMPLE | |
| CANADIEN | 82 |
| 4.2 PROPOSITION D'UNE APPROCHE POUR LA PREDICTION DE VITESSES DE PARCOURS | 85 |
| 4.2.1 Analyses monocritères | 87 |
| 4.2.1.1 Analyse selon les tranches horaires..... | 88 |
| 4.2.1.2 Analyse selon la largeur des chaussées | 90 |
| 4.2.1.3 Analyse selon le nombre de voies | 94 |
| 4.2.1.4 Analyse selon l'importance de la route | 96 |
| 4.2.1.5 Analyse selon la nature du tronçon routier..... | 98 |
| 4.2.1.6 Impact des feux tricolores sur la variation de la vitesse..... | 101 |
| 4.2.2 Analyse multicritères..... | 103 |
| 4.2.2.1 Choix de la méthode statistique descriptive multi dimensionnelles..... | 104 |
| 4.2.2.2 Discussion et analyse des résultats d'application de la méthode ACM | 105 |
| 4.2.2.3 Génération des arbres de décision et des règles de bases..... | 107 |
| 4.2.3 Fiabilité des estimations de vitesses de parcours | 112 |
| CONCLUSION | 122 |
| CHAPITRE 5 VERS DES MODES DE RECHERCHE D'ITINERAIRES DESTINES | |
| AUX SERVICES D'URGENCE | 123 |
| INTRODUCTION..... | 123 |
| 5.1 LA PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE DU PLUS COURT CHEMIN..... | 123 |
| 5.2 DETERMINATION D'UN TYPE DE GRAPHE ADAPTE..... | 124 |
| 5.2.1 Généralités sur les graphes | 124 |
| 5.2.2 Les différents types de graphes | 125 |
| 5.2.2.1 Les graphes statiques..... | 125 |
| 5.2.2.2 Les graphes dynamiques | 126 |
| 5.2.2.3 Les graphes avec intervalles..... | 126 |
| 5.2.2.4 Les graphes adjoints | 130 |

| | |
|---|------------|
| 5.2.3 Choix du type de graphe et implémentation..... | 131 |
| 5.2.3.1 Discussion et choix du type de graphe | 131 |
| 5.2.3.2 Choix de la bibliothèque pour l'implémentation..... | 132 |
| 5.3 DISCUSSIONS ET CHOIX DU MODE DE RECHERCHE D'ITINERAIRES APPROPRIES | 133 |
| CONCLUSION | 142 |
| CHAPITRE 6 UN SYSTEME D'AIDE A LA DETECTION DES INCIDENTS ET A LA | |
| PRISE EN COMPTE DES EVENEMENTS EXCEPTIONNELS POUR LE CALCUL | |
| D'ITINERAIRE EN TEMPS REEL | 143 |
| INTRODUCTION..... | 143 |
| 6.1 PROBLEMATIQUE | 143 |
| 6.2 CONCEPTION ET IMPLEMENTATION D'UN SYSTEME D'AIDE A LA PRISE EN COMPTE DES | |
| EVENEMENTS EXCEPTIONNELS POUR LE CALCUL D'ITINERAIRES EN TEMPS REEL | 146 |
| 6.2.1 Un système basé sur des services web ou une application de messagerie | 147 |
| 6.2.2 Présentation de la notion de message | 151 |
| 6.2.2.1 Les différents types des messages | 152 |
| 6.2.2.2 Description générale du corps d'un message | 152 |
| 6.2.3 Les différents modèles du concept messagerie | 154 |
| 6.2.3.1 Le modèle publication / abonnement | 154 |
| 6.2.3.2 Le modèle point à point..... | 154 |
| 6.2.3.3 Discussion et choix du modèle pour notre projet..... | 155 |
| 6.2.4 Proposition d'une architecture | 156 |
| 6.2.4.1 Architecture générale | 156 |
| 6.2.4.1.1 Diagramme général | 159 |
| 6.2.4.1.2 Cas d'utilisation général..... | 160 |
| 6.2.4.2 Architecture Détaillée | 160 |
| 6.2.4.2.1 Cas d'utilisation détaillé..... | 160 |
| 6.2.4.2.2 Diagramme d'activité (Clients producteurs de messages) | 163 |
| 6.2.4.3 Présentations des corps des messages et les actions provoquées | 165 |
| 6.2.4.3.1 Messages provenant de l'application « Météo France » | 165 |
| 6.2.4.3.2 Messages provenant de l'application « Mairie »..... | 166 |
| 6.2.4.3.3 Messages provenant de l'application « Système de surveillance du trafic | |
| en temps réel »..... | 167 |
| 6.2.4.3.4 Messages provenant de l'application « IGN » | 168 |

| | |
|--|------------|
| 6.2.4.3.5 Message provenant du SMUR..... | 169 |
| 6.2.4.4 Protocole de communication (Implémentation)..... | 169 |
| 6.2.4.4.1 Choix de fournisseurs JMS | 169 |
| 6.2.4.4.2 Diagramme de déploiement..... | 171 |
| 6.2.4.4.3 Diagramme de composants | 174 |
| 6.2.4.4.4 Producteurs de messages | 176 |
| 6.2.4.4.5 Consommateurs de messages | 176 |
| 6.2.4.5 Protocole d'évaluation (tests)..... | 177 |
| CONCLUSION | 181 |
| CONCLUSION ET PERSPECTIVES | 182 |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 1 Les périodes, catégories de jours et les tranches horaires correspondant aux pics de la circulation..... | 67 |
| Tableau 2 Présentations des opérations utilisées dans notre formalisme..... | 71 |
| Tableau 3 Récapitulatif des observations en fonction des tranches horaires..... | 90 |
| Tableau 4 Récapitulatifs des vitesses moyennes, des écarts types et des vitesses médianes observées en fonction des tranches horaires..... | 90 |
| Tableau 5 Récapitulatif des observations en fonction de la largeur des chaussées..... | 93 |
| Tableau 6 Récapitulatifs des vitesses moyennes, des écarts types et des vitesses médianes observés en fonction de la largeur des chaussées..... | 94 |
| Tableau 7 Impact des feux tricolores sur la variation de la vitesse..... | 102 |
| Tableau 8 Récapitulatifs des pourcentages par méthode d'enrichissement pour chaque tranche horaire..... | 119 |
| Tableau 9 Résultats de la comparaison entre les itinéraires proposés par notre calculateur et les trajectoires empruntées par le SMUR..... | 121 |
| Tableau 10 Présentation de quelques fournisseurs de JMS..... | 170 |
| Tableau 11 Test unitaire pour l'envoi et la réception des messages..... | 177 |
| Tableau 12 Test fonctionnel pour la modification des conditions météorologiques..... | 178 |
| Tableau 13 Test fonctionnel pour le blocage d'un tronçon routier..... | 178 |
| Tableau 14 Test fonctionnel pour le trafic réseau perturbé..... | 178 |
| Tableau 15 Test fonctionnel pour le changement caractéristique d'un tronçon routier..... | 179 |
| Tableau 16 Test fonctionnel pour l'envoi de l'itinéraire au système de surveillance du trafic routier..... | 179 |
| Tableau 17 Gestion d'erreur pour un paramètre manquant dans le corps d'un message..... | 180 |
| Tableau 18 Gestion d'erreur pour un destinataire inconnu..... | 180 |
| Tableau 19 Gestion d'erreur pour un tronçon routier inexistant..... | 180 |
| Tableau 20 Gestion d'erreur pour un composant injoignable..... | 181 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 Proposition d'une méthodologie pour l'estimation de vitesses de parcours | 20 |
| Figure 2 Schéma global de la méthodologie employée..... | 22 |
| Figure 3 Etapes de prise en charge d'un patient par le service d'urgence | 27 |
| Figure 4 Centre de contrôle et de gestion du trafic du réseau routier du département (Nice) . | 28 |
| Figure 5 Installation des capteurs sur le réseau routier autour de Lyon (Bousquet., 2010)..... | 37 |
| Figure 6 Véhicule d'urgence équipé par un GPS | 38 |
| Figure 7 Représentation d'un point mobile (1), une région mobile (2) et réel mobile (3) (Guting et al., 2005) | 40 |
| Figure 8 Exemple de projection du type moving(point) dans le domaine temporel | 40 |
| Figure 9 Exemple de profil spatial d'une valeur réelle (Sandu-Popa et al., 2009) | 43 |
| Figure 10 Hiérarchie des types spatiaux dans MADS (Parent, et al., 1997)..... | 46 |
| Figure 11 Hiérarchie des types temporels dans MADS (Parent, et al., 1997)..... | 47 |
| Figure 12 Pictogrammes du modèle STER (Tryfona, et al., 1999)..... | 47 |
| Figure 13 Les pictogrammes du modèle STUML (Price, et al., 2000) | 48 |
| Figure 14 Pictogrammes à caractéristiques spatiales et temporelles de Perceptory (Bedard, 1999)..... | 49 |
| Figure 15 Pictogrammes qui caractérisent une donnée spatiale ou non (Rocha, et al., 2001) | 49 |
| Figure 16 Répartition des types sous Hermes (Pelekis, 2007)..... | 50 |
| Figure 17 Hiérarchie des types spatiaux sous Oracle Spatial..... | 51 |
| Figure 18 Représentation en tranches et types de mouvement d'un point mobile (Boulahya, 2009)..... | 52 |
| Figure 19 Diagrammes des classes des types d'objets mobiles sous Hermes..... | 53 |
| Figure 20 Modèle historique libre modifié | 55 |
| Figure 21 Découpage d'une trajectoire en plusieurs tronçons | 56 |
| Figure 22 Superposition de deux sources de données (à gauche source initiale et à droite recalée) (Oltaneau., 2008) | 57 |
| Figure 23 Mise à jour des données géographiques par le biais du processus d'appariement . | 58 |
| Figure 24 Pré-appariement des nœuds à gauche et pré-appariement des arcs à droite (Mustière et al., 2008) | 59 |
| Figure 25 Appariement des nœuds à gauche, et appariement des arcs à droite (Mustière et al., 2008) | 59 |
| Figure 26 Méthode de map-matching incrémentale (Brakatsoulas et al., 2005)..... | 60 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figure 27 | Mesure de la distance de Hausdorff entre deux lignes (L1, L2) (Oltaneau., 2008). | 61 |
| Figure 28 | Cardinalités des liens du map-matching | 63 |
| Figure 29 | Appariement d'une trajectoire au réseau routier..... | 64 |
| Figure 30 | Localisation d'une trajectoire empruntée par le véhicule d'urgence du SMUR..... | 65 |
| Figure 31 | Les facteurs pouvant influencer la trace d'une trajectoire | 66 |
| Figure 32 | Méthode générale d'enrichissement de la base de données routière | 70 |
| Figure 33 | Représentation en tranches d'un réel mobile moving(real) et de trois points mobiles moving(point)(Güting et al., 2005) | 72 |
| Figure 34 | Exemple d'un schéma conceptuel..... | 75 |
| Figure 35 | Schéma conceptuel de la base de données des trajectoires appariées..... | 77 |
| Figure 36 | Transformation de l'entité « Trajet »..... | 78 |
| Figure 37 | Transformation du cycle de vie de l'entité « Trajet »..... | 78 |
| Figure 38 | Transformation de l'entité « Segment-routier »..... | 79 |
| Figure 39 | Schéma pré-relationnel du schéma conceptuel des trajectoires appariées des interventions | 79 |
| Figure 40 | Répartition des segments routiers par groupe TP, heures de pointe du matin (Loustau et al., 2009)..... | 83 |
| Figure 41 | Méthodologie d'analyse et de classification des tronçons routiers d'après (Kalboussi., 2010) | 84 |
| Figure 42 | Méthodologie pour la prédiction de vitesses de parcours | 86 |
| Figure 43 | Effectifs des vitesses observées dans la tranche 7h-9h..... | 88 |
| Figure 44 | Effectifs des vitesses observées dans la tranche 11h30-14h..... | 88 |
| Figure 45 | Effectifs des vitesses observées dans la tranche 16h30-19h..... | 89 |
| Figure 46 | Effectifs des vitesses observées dans la tranche du reste de la journée | 89 |
| Figure 47 | Vitesse moyenne en fonction de la largeur des chaussées..... | 91 |
| Figure 48 | Effectifs des vitesses observées sur les routes dont la largeur des chaussées appartient à la classe 1..... | 91 |
| Figure 49 | Effectifs des vitesses observées sur les routes dont la largeur des chaussées appartient à la classe 2..... | 92 |
| Figure 50 | Effectifs des vitesses observées sur les routes dont la largeur des chaussées appartient à la classe 3..... | 92 |
| Figure 51 | Effectifs des vitesses observées sur les routes dont la largeur des chaussées appartient à la classe 4..... | 93 |
| Figure 52 | Effectifs des vitesses observées sur les routes à 1 voie | 94 |

| | |
|--|-----|
| Figure 53 Effectifs des vitesses observées sur les routes à 2 voies | 95 |
| Figure 54 Effectifs des vitesses observées sur les routes à 3 voies | 95 |
| Figure 55 Effectifs des vitesses observées sur les routes à 4 voies | 96 |
| Figure 56 Effectifs des vitesses observées sur des routes dont l'importance est égale à 1 | 96 |
| Figure 57 Effectifs des vitesses observées sur les routes dont l'importance est égale à 2 | 97 |
| Figure 58 Effectifs des vitesses observées sur les routes dont l'importance est égale à 3 | 97 |
| Figure 59 Effectifs des vitesses observées sur les routes dont l'importance est égale à 4 | 98 |
| Figure 60 Effectifs des vitesses observées sur les routes dont l'importance est égale à 5 | 98 |
| Figure 61 Effectifs des vitesses observées sur les routes de type bretelle | 99 |
| Figure 62 Effectifs des vitesses observées sur les routes de type « Route à 1 chaussée » | 99 |
| Figure 63 Effectifs des vitesses observées sur les routes de type « Route à 2 chaussées » ... | 100 |
| Figure 64 Effectifs des vitesses observées sur les routes de type Route empierrée | 100 |
| Figure 65 Effectifs des vitesses observées sur les routes de type Quasi-Autoroute | 101 |
| Figure 66 Effectifs des vitesses observées sur les routes de type Autoroute | 101 |
| Figure 67 Exemple de principe d'analyse d'impact de feu tricolore sur la variation de la vitesse | 102 |
| Figure 68 Les facteurs considérés dans l'analyse multicritères | 104 |
| Figure 69 Matrice de corrélation entre les différentes classes des facteurs retenus | 106 |
| Figure 70 Résultats d'application de l'algorithme de la création de l'arbre de décision | 108 |
| Figure 71 Résultats d'application de l'algorithme de la création de l'arbre de décision | 109 |
| Figure 72 Carte routière enrichie par des vitesses observées dans la tranche horaire « reste de la journée » | 109 |
| Figure 73 Carte routière enrichie par des vitesses observées dans la tranche horaire « 7h-9h » | 110 |
| Figure 74 Carte routière enrichie par des vitesses observées dans la tranche horaire « 11h30_14h » | 110 |
| Figure 75 Carte routière enrichie par des vitesses observées dans la tranche horaire « 16h30_19h » | 111 |
| Figure 76 Vitesses moyennes et écart-types observés dans la tranche horaire « reste de la journée » et sur des routes dont la largeur des chaussées est supérieure ou égale à 2 mètres et inférieure ou égale à 5 mètres | 112 |
| Figure 77 Vitesses moyennes et écart-types observés dans la tranche horaire « 7h-9h » et sur des routes dont la largeur des chaussées est supérieure ou égale à 2 mètres et inférieure ou égale à 5 mètres. | 113 |

| | |
|--|-----|
| Figure 78 Vitesses moyennes et écart-types observés dans la tranche horaire « 11h30-14h » et sur des routes dont la largeur des chaussées est supérieure ou égale à 2 mètres et inférieure ou égale à 5 mètres. | 113 |
| Figure 79 Vitesses moyennes et écart-types observés dans la tranche horaire « 16h30-19h » et sur des routes dont la largeur des chaussées est supérieure ou égale à 2 mètres et inférieure ou égale à 5 mètres. | 113 |
| Figure 80 Indice de dispersions des règles de décisions pour le premier arbre | 115 |
| Figure 81 Indice de dispersions des règles de décisions pour le deuxième arbre | 116 |
| Figure 82 Effectifs des vitesses observées sur des routes dont la largeur des chaussées appartient à la classe II du premier arbre de décision..... | 117 |
| Figure 83 Effectifs des vitesses observées sur des routes dont l'importance est égale à 2 | 117 |
| Figure 84 Répartition empirique des vitesses observées sur des routes dont l'importance est égale à 2..... | 118 |
| Figure 85 Route enrichie par les méthodes directe et indirecte | 119 |
| Figure 86 Application de l'algorithme de Dijkstra en fonction des tranches horaires..... | 120 |
| Figure 87 Exemple de plusieurs chemins dans un graphe | 124 |
| Figure 88 Exemple d'un graphe orienté | 124 |
| Figure 89 Exemple d'un graphe non orienté | 125 |
| Figure 90 Hiérarchie des types de graphes orientés | 125 |
| Figure 91 Exemple d'un graphe orienté statique | 126 |
| Figure 92 Exemple d'un graphe dynamique | 126 |
| Figure 93 Exemple d'un graphe avec intervalles | 127 |
| Figure 94 Exemple de la notion d'horizon (Hizem., 2008)..... | 128 |
| Figure 95 Transformation d'un graphe initial vers un graphe adjoint | 130 |
| Figure 96 Hiérarchie des modes de recherche du plus court chemin..... | 133 |
| Figure 97 Représentations des solutions $\{A\}$ dans l'espace de la distance et de l'insécurité | 134 |
| Figure 98 Algorithme de Dijkstra d'après (Grabener, 2010)..... | 136 |
| Figure 99 Algorithme de Bellman Ford d'après (Grabener, 2010)..... | 136 |
| Figure 100 Algorithme de Dijkstra généralisé d'après (Grabener, 2010)..... | 137 |
| Figure 101 Algorithme de Bellman Ford étendu en mode dynamique | 138 |
| Figure 102 Le plus court chemin avec un coût de longueur infinie | 138 |
| Figure 103 Exemple de variation du temps de parcours sur un arc routier..... | 139 |
| Figure 104 Algorithme des k plus rapides chemins d'après (Yen, 1971) | 140 |
| Figure 105 Déviation d'un itinéraire par rapport à un ensemble d'itinéraires | 141 |

| | |
|---|-----|
| Figure 106 Routes congestionnées suite à un embouteillage | 144 |
| Figure 107 Routes congestionnées suite à la chute de neige..... | 144 |
| Figure 108 Acteurs intervenant dans notre système d'information | 145 |
| Figure 109 Schéma requête/réponse entre deux applications | 147 |
| Figure 110 Schéma de communication d'application basé sur les services web | 149 |
| Figure 111 Schéma général du mode de fonctionnement du concept de messagerie | 150 |
| Figure 112 Schéma de communication d'application basé sur le concept messagerie..... | 151 |
| Figure 113 Hiérarchie des interfaces de Message | 152 |
| Figure 114 Caractéristique d'un message | 152 |
| Figure 115 Schéma général du principe du modèle Publication / abonnement | 154 |
| Figure 116 Schéma général du principe du modèle Point à point..... | 155 |
| Figure 117 Architecture basée sur le modèle pub / sub | 155 |
| Figure 118 Architecture basée sur le modèle point à point..... | 156 |
| Figure 119 Diagramme général du système | 159 |
| Figure 120 Cas d'utilisation général de notre système..... | 160 |
| Figure 121 Diagramme cas d'utilisation général pour tous les acteurs..... | 161 |
| Figure 122 Exemple d'application d'un degré d'optimisme selon les conditions météorologiques | 162 |
| Figure 123 Diagramme cas d'utilisation pour l'acteur ambulancier | 162 |
| Figure 124 Diagramme cas d'utilisation pour l'acteur ambulancier..... | 163 |
| Figure 125 Diagramme d'activité d'envoi et de réception des messages | 164 |
| Figure 126 Structure du message envoyé par l'application « Météo France » | 165 |
| Figure 127 Présentation des différents types de messages provenant de l'application..... | 166 |
| Figure 128 Structure d'un message envoyé par un système de surveillance du trafic en temps réel..... | 167 |
| Figure 129 Structure des messages envoyés par l'application « IGN »..... | 168 |
| Figure 130 Structure d'un message envoyé par le client SMUR | 169 |
| Figure 131 Interface d'administration des messages (ActiveMQ)..... | 171 |
| Figure 132 Diagramme de déploiement du système | 173 |
| Figure 133 Diagramme des composants du système..... | 175 |
| Figure 134 Paquetage SMURProducer | 176 |
| Figure 135 Paquetage SMURConsumer | 177 |
| Figure 136 Capture d'écran pour la saisie de l'adresse de départ et d'arrivé | 196 |

| | |
|---|-----|
| Figure 137 Capture d'écran des deux itinéraires retournés par le moteur de recherche d'itinéraires..... | 196 |
| Figure 138 Capture d'écran pour la sauvegarde des itinéraires | 197 |
| Figure 139 Capture d'écran pour le choix de formats de sauvegarde des itinéraires..... | 197 |
| Figure 140 Sélection d'une rue à barrer | 198 |
| Figure 141 Saisie de la date de l'événement | 198 |
| Figure 142 Saisie de l'heure du début et de la fin de l'événement | 199 |

Liste des annexes

| | |
|---|------------|
| ANNEXE A IMPLEMENTATION DU CALCULATEUR D'ITINERAIRE | 196 |
| ANNEXE B UN EXEMPLE DE SIMULATION DE L'ACTEUR MAIRIE | 198 |

Introduction

Eléments de contexte

De nos jours, la gestion des véhicules d'urgence est l'ambition de toute société. Selon (Gendreau et al, 1997), ce problème engendre plusieurs types de décisions : stratégiques, tactiques et opérationnelles. Les décisions stratégiques sont liées aux constructions des bâtiments des services d'urgences et aux sites d'attentes pour leurs véhicules. Elles concernent aussi le recrutement et la formation du personnel impliqué. Les décisions tactiques peuvent être divisées en deux niveaux : le premier niveau est lié à la détection et à la localisation des incidents, le deuxième concerne la localisation, l'envoi vers le lieu d'une intervention et la relocalisation des véhicules d'urgence (les ambulances ou les véhicules légers). Enfin, les décisions opérationnelles consistent à définir les consignes et les procédures à suivre par le personnel du service d'urgence lors de son intervention.

Au niveau des décisions tactiques, la localisation rapide d'un incident et le choix d'itinéraires à emprunter par le service d'urgence pourront être décisifs pour la vie d'un patient en détresse.

Selon les ambulanciers du SMUR, le meilleur itinéraire est celui qui amène le plus rapidement sur les lieux d'interventions. Le choix de l'itinéraire pourra être directement influencé par des phénomènes de congestion récurrente, les événements imprévus et la connaissance du réseau routier. Afin d'évaluer le coût de la congestion récurrente, une étude a été réalisée en 2002 par le gouvernement canadien. Le coût général a été estimé à une valeur comprise entre 2,3 et 3,7 milliards de dollars annuellement. Il est réparti de la façon suivante : 90% est lié au temps perdu par les automobilistes, 7% est dû à l'augmentation de la consommation de carburant et 3% est attribué à la pollution de l'atmosphère. En parallèle avec la congestion récurrente, d'autres types d'événements peuvent influencer sur l'état du trafic. A titres d'exemples, on peut citer les événements prévus tels que les travaux publics, les manifestations et les conditions météorologiques, ainsi que les événements imprévus comme les accidents. (Fhwa, 2004) a réalisé une étude sur les types de congestion observés en région parisienne. L'étude a montré que 73% de la congestion observée est de type récurrente, 10% est non récurrente et imprévisible (accidents et pannes) et 17% est non récurrente et prévisible (travaux publics).

Actuellement, Internet constitue un outil essentiel pour la diffusion d'informations sur les transports, les conditions de circulation et la recherche du meilleur itinéraire.

Des services d'information sur les conditions de circulation et de calcul d'itinéraires sont proposés par des sites web tels que sytadin (www.sytadin.fr) à Paris, coraly (www.coraly.fr) à Lyon ou encore Google Maps (maps.google.fr), Mappy (www.mappy.fr), Viamichelin (www.viamichelin.fr) et

V- Trafic (www.V-traffic.com). Sur le portail web geovelo (www.geovelo.fr), adapté aux modes doux, le calcul d'itinéraires propose le meilleur itinéraire en fonction de plusieurs critères tels que la distance totale, la sécurité de l'itinéraire et l'effort fourni par le cycliste.

Ces moteurs de recherche d'itinéraires ne sont pas adaptés pour les situations d'urgences. D'une part, ces calculateurs n'utilisent pas des estimations réelles du temps de parcours destiné aux services d'urgence : ils se basent sur des valeurs standards de limitation de vitesse ou encore ajustées dans un contexte d'urgence. D'autre part, les algorithmes de recherche d'itinéraires utilisés ne tiennent pas compte des incertitudes sur l'estimation du temps de parcours.

Le meilleur itinéraire destiné aux services d'urgences doit impérativement prendre en considération les estimations réelles aussi bien que tout facteur pouvant influencer sur l'état du trafic (événements exceptionnels prévus ou imprévus). C'est dans cette optique que s'inscrivent nos travaux de recherche.

Objectifs de la thèse

L'objectif essentiel de notre projet est la détermination du meilleur itinéraire pour le service d'urgence lors de son intervention. Pour ce faire, nous proposons une démarche méthodique en vue d'implémenter un système d'information pour le calcul d'itinéraires destiné au service d'urgence.

Notre projet a été réalisé en trois parties (figure 2). La première vise à estimer les vitesses de parcours. Dans cette partie, notre idée est d'exploiter l'historique des trajectoires empruntées par le service d'urgence lors de son intervention (figure 1). Un calculateur d'itinéraire basé sur des estimations de vitesses de parcours sera plus fiable que ceux qui se basent sur des limitations. Nous suggérons donc la résolution des questions suivantes.

1) Modélisation des données spatio-temporelles et implémentation de la base de données des trajectoires appariées pour l'estimation de vitesses de parcours.

Le but de cette étape est de pouvoir modéliser le plus fidèlement possible l'historique des trajectoires des interventions effectuées par le service d'urgence. Nous proposons d'enrichir un modèle conceptuel par des types et des méthodes abstraits.

Un tel schéma conceptuel pourra faciliter la tâche de l'estimation de vitesses de parcours. Nous détaillons par ailleurs les règles de transformations utilisées lors du passage vers un modèle logique.

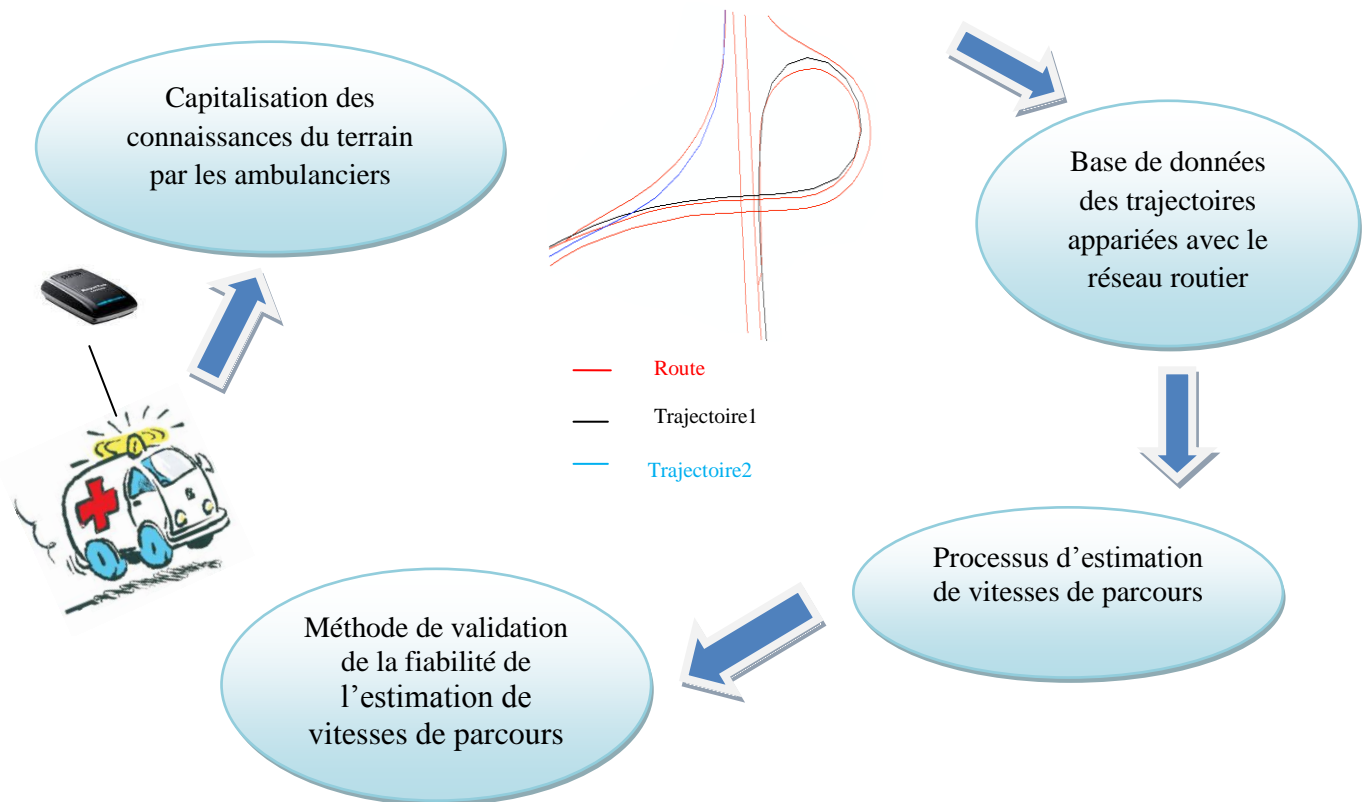


Figure 1 Proposition d'une méthodologie pour l'estimation de vitesses de parcours

2) Estimation de vitesses de parcours et méthode de validation :

La deuxième étape se focalise sur l'estimation de vitesses de parcours. Elle se décline en deux méthodes :

- la méthode directe vise à estimer directement les vitesses de parcours en fonction des tranches horaires sur un tronçon routier lorsqu'on a assez d'observations.
- la méthode indirecte nous permet d'estimer les vitesses de parcours sur un tronçon routier dans le cas où nous n'avons pas assez d'observations enregistrées. Afin de résoudre ce problème, nous procédons par une stratégie basée sur l'application de vitesses moyennes en fonction de règles de décision.

Dans le but d'examiner la fiabilité du processus d'estimation de vitesses de parcours, nous réalisons une comparaison entre des itinéraires proposés par un algorithme du plus court chemin et l'historique des trajectoires.

La deuxième partie se concentre sur la détermination du mode de recherche d'itinéraire le plus adapté pour un contexte d'urgence. Le mode monocritère dépendant du temps et avec graphe par intervalles sera retenu comme mode de base pour notre projet. Nous proposons deux versions de la recherche d'itinéraires : un seul et unique chemin le plus rapide et les k premiers chemins optimaux. Afin de minimiser le risque de blocage, la deuxième version sera bénéfique dans le cas où deux équipes partent pour une même intervention en empruntant chacune un chemin différent.

La troisième et dernière partie concerne la conception et l'implémentation d'un système d'aide à la prise en compte des perturbations du trafic et de détection des incidents en temps réel. Nous y présentons tous les éléments nécessaires pour la conception et l'implémentation de notre système.

Organisation du manuscrit

Le présent document est organisé de la manière suivante.

Nous commençons par la description générale du système d'urgence en France, ainsi que des acteurs qui y interviennent. Nous présentons aussi notre contexte opérationnel.

Le deuxième chapitre se focalise sur une revue de la littérature des techniques d'estimation du temps de parcours, de modélisation et de gestion des données spatio-temporelles.

Dans le troisième chapitre, nous décrivons notre démarche pour enrichir une base de données routière par des estimations de vitesses de parcours.

Dans le quatrième chapitre, nous proposons une démarche statistique pour la prédiction de vitesses de parcours et une méthode permettant d'évaluer la fiabilité de processus global d'estimation des vitesses.

Le cinquième chapitre présente un état de l'art sur les modes de recherche du plus rapide chemin. Un seul sera retenu pour notre projet.

Enfin, le dernier chapitre s'intéresse à la modélisation, l'implémentation et la fiabilité d'un système d'aide à la prise en compte de la perturbation du trafic, la détection des incidents et la collaboration avec un système de contrôle de feux tricolores et les barrières automatiques en temps réel.

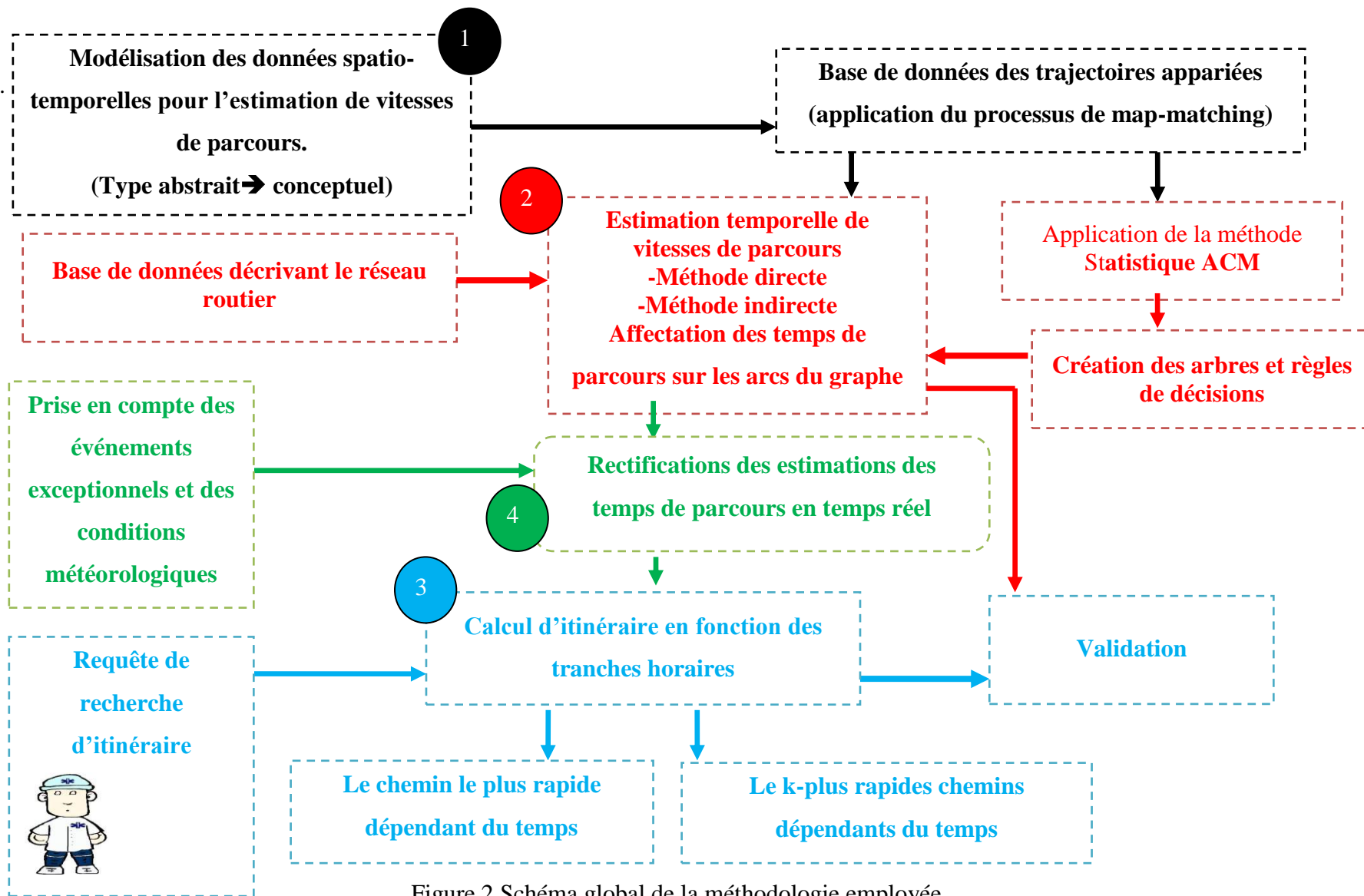


Figure 2 Schéma global de la méthodologie employée

Chapitre 1 Amélioration de l'efficacité des services d'interventions et contexte opérationnel

Introduction

Suite à des avancées technologiques, l'optimisation de la gestion des véhicules d'urgences constitue un thème de recherche pour de nombreux travaux.

Dans ce chapitre, et dans un premier temps, nous décrirons le système d'urgence en France ainsi que les différents acteurs y intervenant. Dans un deuxième temps, nous présenterons un état de l'art sur l'amélioration du processus de la prise en charge d'un patient par le service d'urgence (SAMU/SMUR). Enfin, nous réaliserons une étude sur les différentes techniques utilisées lors de la recherche du meilleur itinéraire pour une intervention dans notre contexte opérationnel.

1.1 Présentation générale du système d'urgence en France

Afin de garantir l'efficacité du système d'urgence, il est important de s'assurer de la bonne coordination entre les différents intervenants au cours du processus de secours : de l'amont à l'aval des établissements d'urgences.

Dans le but d'améliorer cette structure, l'organisation du système d'urgence en France a créé en 1986 des Services d'Aide Médicale Urgente (SAMU) et des centres d'appel téléphonique spécialisés.

Par ailleurs, les décrets du 9 mai 1995 et du 30 mai 1997 ont permis de faire progresser cette structure par l'amélioration du système d'orientation des patients en distinguant les urgences vitales des autres.

Ces mêmes décrets ont permis de renforcer les structures d'accueil. La structure de la prise en charge des urgences renferme les urgences pré-hospitalières, les urgences hospitalières, les soins et la prise en charge des patients à la sortie des urgences. La coordination entre les différents acteurs intervenant dans le réseau des urgences garantit l'efficacité de la prise en charge.

Ce réseau est constitué de différents acteurs qui peuvent être classés selon leurs rôles et positions sur le parcours de la prise en charge des urgences (Sfmu., 2008) :

- Les urgences pré-hospitalières : le Service d'Aide Médicale d'Urgence (SAMU), la régulation des appels adressés au Centre 15, le Service de Médecine d'Urgence et de Réanimation (SMUR).
- L'accueil et le traitement des urgences : le Service d'Accueil et de traitement des Urgences (SAU).
- L'aval des urgences : l'Unité d'Hospitalisation de Courte Durée (UHCD), les établissements des Soins de Suite et de Réadaptation (SSR).

1.1.1 Les urgences pré-hospitalières

La médecine d'urgence pré-hospitalière est la médecine pratiquée à l'extérieur de l'hôpital qui va secourir toute personne en détresse, tout en étant rapide et efficace.

L'importance de l'urgence pré-hospitalière réside dans le fait qu'elle constitue le premier maillon de la chaîne de prise en charge. C'est aussi le premier contact entre le patient et le personnel.

Le système d'urgence pré-hospitalière en France est l'un des systèmes les plus compliqués du monde (Secourisme-pratique, 2005). Il a la particularité d'exiger la présence d'un médecin à tous les niveaux de prise en charge de l'urgence, de l'appel au centre de régulation à l'intervention sur le terrain de la détresse. Ce système est assuré par plusieurs acteurs.

1.1.1.1 Les acteurs

Service d'Aide Médicale Urgente (SAMU)

Toute l'organisation française de l'Aide Médicale Urgente est basée sur les SAMU. Ces derniers veillent à la bonne coordination de la médecine pré-hospitalière.

Ce sont des services départementaux d'organisation des secours dont les missions sont précisées par la loi de 1986.

En plus d'une écoute médicale permanente, ils ont pour mission de mettre en œuvre, le plus rapidement possible, la réponse la plus convenable en fonction de la nature de l'appel:

- simple conseil médical
- envoi d'une ambulance privée
- orientation vers le médecin généraliste
- envoi d'une ambulance de réanimation (Unité Mobile Hospitalière), véhicule d'intervention rapide ou hélicoptère sanitaire pour les cas les plus alarmants (en réponse à une situation de crise où les victimes sont très nombreuses).

Il est indispensable que les SAMU s'assurent que les moyens d'hospitalisation publics ou privés sont disponibles, tout en respectant le libre choix des victimes. Par ailleurs, ils doivent organiser leur transport en utilisant les moyens adéquats. De plus, ils ont la tâche d'organiser l'accueil hospitalier des victimes en les orientant vers le centre de soins adapté à la maladie à traiter. En outre, ils contribuent à la mise en place et au déroulement des plans de secours, en particulier lors des grands rassemblements pouvant dégénérer en accidents avec un grand nombre de victimes. Finalement, ils enseignent la médecine d'urgence et assurent la formation du personnel de santé aux gestes et techniques nécessaires d'urgence.

Service Mobile d'Urgence et de Réanimation (SMUR)

Le SMUR est une équipe médicale mobile dont la mission est de présenter à la personne en détresse une aide médicale urgente lors d'un accident ou d'un malaise. L'équipe de SMUR doit se dépêcher sur les lieux de la détresse pour traiter et transporter les patients vers un établissement de soins préalablement prévu.

Afin de faciliter le travail, plusieurs moyens de transport sont mis à la disposition des équipes de SMUR :

- Le véhicule médicalisé léger (VML)
- Le véhicule lourd (Unité Mobile Hospitalière, UMH) dans lequel le patient peut être pris en charge.

Dans la plupart des cas, l'équipe de SMUR est constituée d'un médecin spécialiste en médecine d'urgence, d'un infirmier et d'un conducteur ambulancier. Les interventions du SMUR peuvent être primaires ou secondaires.

a) Intervention primaire

C'est l'intervention sur les lieux d'accidents (voie publique, du travail, lieux publics, au domicile des patients), ou dans un établissement de soins pour une prise en charge initiale, un conditionnement et le transport vers un centre hospitalier.

Il est à noter que le SMUR peut changer de direction au cours d'une intervention, lorsque le permanencier estime qu'une autre situation d'urgence est plus prioritaire.

Le patient ou ses proches ont le droit de choisir l'une ou l'autre des structures d'hospitalisation en secteur public ou privé. C'est au médecin régulateur de s'assurer que le centre de soins choisi possède les moyens nécessaires au traitement du patient.

b) Intervention secondaire

Il s'agit du transfert du patient d'un hôpital à un autre ou entre deux services de la même structure. C'est le médecin responsable du malade auprès du médecin régulateur qui effectue toute demande d'intervention secondaire. Cependant, toute décision thérapeutique ou investigation nécessaire lors du transport est placée sous la responsabilité du médecin transporteur.

Service Départemental d'Incendie et de Secours (SDIS)

Les sapeurs pompiers sont appelés à intervenir dans plusieurs situations conjointement avec le SMUR: incendie, noyade, brûlures, asphyxie, accident de la route.

La mission des sapeurs-pompiers consiste essentiellement à aider les personnes en détresse en effectuant les gestes de premiers secours et en appelant si nécessaire le SAMU ou un médecin d'urgence.

1.1.1.2 Cycle de vie de prise en charge d'un patient par le SAMU/SMUR

Le premier maillon de la prise en charge par les services d'urgence est la réception et le traitement de l'appel pour secours. Cette étape conditionne et déclenche les moyens de secours à adopter.

Conformément à la loi du 6 janvier 1986 sur l'Aide Médicale Urgente (SAMU), chaque département est équipé d'un centre de réception et de gestion des appels médicaux urgents. Trois numéros (15, 18 et 112) sont accessibles au public. Le 15 est le numéro des SAMU. Il est lié aux autres numéros téléphoniques des services de secours : 18 (Sapeurs-pompiers) et le 112 (numéro européen des urgences). Les différents services sont capables de recevoir et de traiter 24 heures sur 24 les appels d'urgence. Le numéro d'appel d'urgence 112 est accessible partout en Europe pour appeler les pompiers, la police ou le SAMU. En France, le 112 est le plus souvent reçu par les pompiers ou le SAMU. Le service qui reçoit l'appel va décider si l'intervention fait partie de ses missions ou non, sinon il transfère l'appel vers le service concerné. Au sein des centres 15, l'appel est traité par un permanencier spécialement formé à la régulation médicale. Il a pour mission de noter les coordonnées de l'appelant et le motif de l'appel qui sera transmis au médecin régulateur. Ce dernier prend une décision qui peut être une simple orientation vers une consultation, l'envoi d'un médecin généraliste ou une intervention du SMUR. Comme nous l'avons précédemment décrit, le SMUR est une équipe hospitalière médicalisée, responsable d'assurer les premiers secours et de transporter les personnes blessées.

Dans la section suivante, nous présentons un état de l'art sur l'amélioration de la gestion du processus de prise en compte d'un patient par le service d'urgence. Trois phases seront détaillées : la localisation des incidents, la gestion de positionnement, le repositionnement des véhicules d'urgences et la recherche d'itinéraires pour une intervention.

1.1.2 Etat de l'art sur l'amélioration du processus de prise en compte des patients en situation d'urgence

Dans cette section, nous présentons une revue de littérature sur l'amélioration du processus de prise en charge des patients par le service d'urgence. L'enchaînement du processus est présenté dans la figure 3.

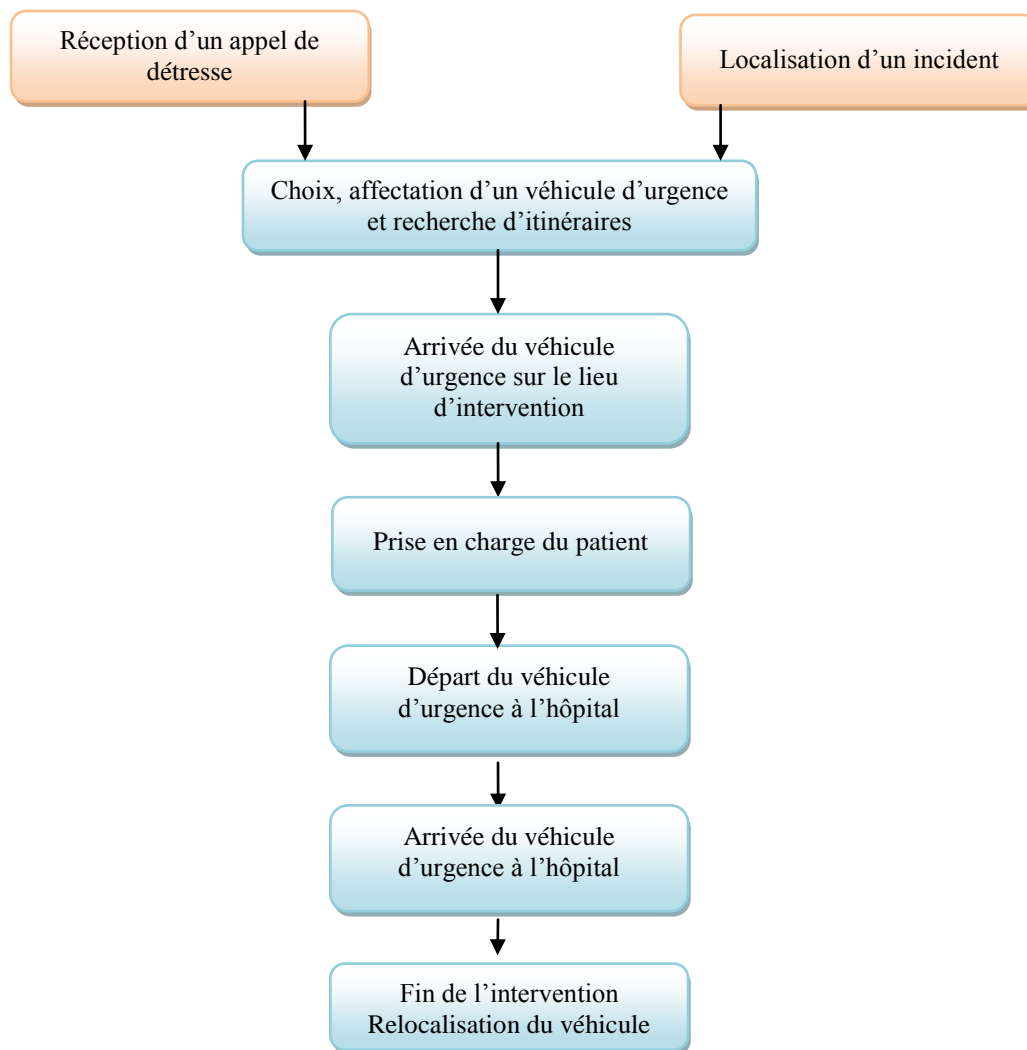


Figure 3 Etapes de prise en charge d'un patient par le service d'urgence

1.1.2.1 La localisation des incidents

La première phase du processus de prise en charge d'un patient par le service d'urgence (SAMU/SMUR) est la localisation d'un lieu d'une intervention (au domicile, lieu de travail ou sur une voie publique). Généralement, cette localisation est déterminée par les informations fournies par les patients ou par leurs proches. Dans le cas d'une intervention sur une voie publique, les urgentistes se basent sur le civisme des citoyens.

Toujours dans le but de détecter et de localiser finement un incident, le service d'urgence peut coordonner avec les opérateurs de contrôle des systèmes de surveillance du réseau routier. Parmi les premiers systèmes, on cite le projet européen In-Response (Cohen, 1999).

Le but de ce système est de surveiller le réseau autoroutier. En cas d'incident, un opérateur de contrôle peut déclencher une alerte d'urgence. Il peut également transférer au service d'urgence la nature et la

gravité de l'incident. Le système a été testé en coopération avec l'INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité). Le gain a été évalué à 15 minutes sur le temps d'intervention du SAMU.

En 2006, le Conseil Général de Nice a créé un centre de supervision et de gestion de trafic (figure 4). Les objectifs derrière la création de ce centre sont :

- le pilotage des feux tricolores et des barrières à distance,
 - la détection des incidents (comme la présence de fumée ou les accidents). Dans cette situation, un opérateur de contrôle pourra se coordonner avec les services d'urgences SAMU/SMUR.
 - la possibilité d'informer les automobilistes sur le degré de congestion, les estimations des temps de parcours par le biais des panneaux à messages variables et les travaux en cours sur le réseau routier en temps réel. Ces informations sont accessibles via le site web Info Routes 06 (www.inforoutes06.fr).
- Actuellement, le système supervise plus de 2600 km de routes départementales et 143 tunnels. La ville de Nice est équipée de 132 caméras numériques, 61 panneaux à messages variables et 70 stations de comptages de véhicules. Le centre de contrôle est géré par 14 agents.



Figure 4 Centre de contrôle et de gestion du trafic du réseau routier du département (Nice)

Un tel système s'avère utile pour le service d'urgence puisqu'il réduit le problème de la localisation imprécise des incidents. Une coordination entre un opérateur de contrôle du système de surveillance du trafic et les urgentistes peut réduire le délai d'une intervention. Le pilotage des feux tricolores et des barrières peut être défini suivant l'itinéraire prévu pour le service d'intervention.

1.1.2.2 Le positionnement, l'affectation et le redéploiement des véhicules d'urgences

Une fois que le SAMU arrive à détecter et à localiser un tel incident, le choix du véhicule à envoyer vers un site d'intervention se pose. Un tel choix pourra réduire le temps d'une intervention. Généralement, ce type de problème se pose lorsque l'on dispose de plus d'un site d'attente de véhicule

d'urgence ou encore de plusieurs centrales de SAMU/SMUR dans une même ville. Actuellement, la technique la plus adaptée est d'affecter le véhicule le plus proche au lieu d'intervention.

L'amélioration de la gestion des véhicules rencontre trois problèmes : le positionnement, l'affectation et le redéploiement. Dans cette section, nous présentons quelques travaux qui visent à résoudre et à optimiser les solutions pour ces trois problèmes.

1.1.2.3 Optimisation du positionnement des véhicules d'urgences

Le problème de positionnement consiste à localiser un nombre de véhicules d'urgence disponibles sur les différents sites d'attente (locaux de stationnements des véhicules d'urgence) afin de minimiser le délai d'une intervention en tout point du réseau routier (ReVelle et al., 2005) .

Ce problème peut être formulé de la façon suivante. Pour un nombre N de points d'appel, comment optimiser la répartition de Q ambulances parmi M sites d'attente, de façon à maximiser le nombre d'appels couverts ? Parmi les premiers travaux de recherche qui ont résolu ce problème, on cite le modèle MEXCLP (maximum expected coverage location problem) de Daskin (1983). Le modèle a été testé pour les services d'urgences publics de Bangkok pour 59 points d'appel (N), 46 sites d'attente (M) et un nombre de véhicules d'urgence (Q) variant de 10 à 30.

Toujours dans le but d'optimiser la localisation des véhicules d'urgences, (Repede et al., 1994) ont proposé un nouveau modèle nommé TIMEXCLP (maximum expected coverage location problem with time variation). Ce dernier est une généralisation du modèle MEXCLP.

Le modèle TIMEXCLP tient compte de la variabilité temporelle des nombres d'appels prévus.

Pour plus d'explication sur la formulation mathématique des modèles MEXCLP et TIMEXCLP, le lecteur peut se référer à (Brotcorne et al. 1999). Les deux modèles présentés se basent sur une programmation linéaire en nombre entier.

1.1.2.4 Optimisation d'affectation et redéploiement des véhicules d'urgences

Après avoir bien réparti les ambulances sur les sites d'attentes, le problème lié à l'optimisation d'affectation ou leredéploiement de ces véhicules se pose. Le problème d'affectation consiste à envoyer une ambulance à un point d'appel donné parmi les véhicules qui sont libres ou de retour depuis un lieu d'intervention. Le redéploiement d'une ambulance consiste à choisir un site d'attente pour se repositionner après avoir terminé son intervention.

Le problème d'affectation doit tenir compte en premier ordre du déploiement courant des véhicules, et en deuxième ordre d'un ensemble de contraintes (Brotcorne et al. 1999) :

- Parmi les véhicules libres ou en retour d'une intervention dans une période de temps, choisir une ambulance qui peut arriver le plus rapidement au lieu d'intervention.

- Parmi les véhicules libres ou en retour situés à l'intérieur du rayon de couverture du lieu de l'intervention, choisir celui qui minimise le nombre de points d'appels qui deviendront non couverts après son départ.

En ce qui concerne les contraintes liées à l'optimisation de redéploiement des véhicules d'urgences, on cite :

- Déplacer le nombre nécessaire et minimal de véhicules pour une intervention,
- Prendre en considération les heures de repas du personnel du SMUR,
- Maximiser le repositionnement des véhicules sur les sites d'attente initiaux,
- Minimiser les aller/retours d'un même véhicule entre deux sites d'attentes.

1.1.2.5 L'envoi des véhicules d'urgence et la recherche du meilleur itinéraire

La dernière phase du processus de prise en charge des patients par le service d'urgence consiste à envoyer un ou plusieurs véhicules vers un lieu d'intervention. Cette étape engendre un nouveau type de problème : le choix d'itinéraire à emprunter. Le choix de l'itinéraire par les ambulanciers est généralement basé sur leurs connaissances sur le terrain ou encore sur l'utilisation de nouvelles technologies telles que les GPS de navigation et les calculateurs d'itinéraires destinés aux services d'urgences (les calculateurs d'itinéraires utilisent des estimations du temps de parcours ajustées pour des situations d'interventions). A titre d'exemple de moteur de recherche d'itinéraire destiné aux services d'urgence, on cite le calculateur SmartRouting développé par l'entreprise GeoConcept¹. Le moteur se base sur un ajustement des vitesses de parcours destiné aux services d'interventions (les policiers ou encore les pompiers).

Notre projet sera pointu sur cette phase. Nous proposerons une étude complète sur la conception et l'implémentation d'un système d'information pour le calcul d'itinéraire. Dans la section (1.2), nous détaillerons d'avantage l'étude de l'existant dans notre contexte opérationnel.

1.1.2.6 Performance et outils de simulation de la gestion de prise en compte des patients par les services d'urgence

Selon (Savas el al., 1969), le service d'urgence peut être évalué par deux indicateurs : le temps de réponse et le temps total d'une intervention.

Le temps de réponse est la période de temps entre la réception d'un appel de détresse et l'arrivée de l'équipe d'urgence sur le lieu d'intervention.

Le temps total d'une intervention correspond à la période entre la réception d'un appel de secours et l'évacuation des patients vers les hôpitaux.

(Sua. Et al., 2003) utilisent plusieurs indicateurs pour évaluer la performance des services d'urgences. Parmi ces indicateurs, on cite le temps d'attente moyen d'un appel de secours, le temps nécessaire à

¹ <http://www.geoconcept.com>

l'arrivée vers un lieu d'intervention, le temps nécessaire à l'arrivée du lieu d'intervention vers l'hôpital et le temps total d'une intervention.

Pour pouvoir simuler le fonctionnement des différents modèles présentés auparavant, un tel simulateur doit avoir impérativement en entrée une série de nombres d'appels dont les données suivantes sont connues : le temps de réception des appels, le lieu d'intervention, l'adresse de l'hôpital de destination, le nombre et la localisation des véhicules d'urgences en attente. Les modèles présentés auparavant (MEXCLP et TIMEXCLP) peuvent être construits par le biais d'un langage de simulation comme **Arena** ou encore **SimFactory**.

1.2 Etude de l'existant et contexte opérationnel

Afin de réaliser notre projet, nous avons effectué une coopération avec le SAMU/SMUR du Mans (département de La Sarthe). Au Mans, un seul service d'urgence est opérationnel. Il utilise un seul site d'attente pour les véhicules d'urgences.

Actuellement, et pour se rendre rapidement sur une zone d'intervention, les ambulanciers du SMUR du Mans se basent généralement sur leurs connaissances du terrain complétées par la consultation de cartes routières à différentes échelles. Ils peuvent aussi utiliser les services cartographiques en ligne (comme Google Maps) ou un GPS de navigation afin de déterminer le meilleur itinéraire pour une intervention. Ils ne disposent d'aucune coordination avec un système de surveillance ou de gestion du trafic en temps réel. Les différents types de perturbation du trafic prévus ne sont pas pris en considération lors de la recherche d'itinéraire.

Toutes ces insuffisances peuvent avoir des effets néfastes sur les patients et engendrer un retard du SMUR lors de son intervention, d'où l'utilité et la motivation de réaliser un système d'informations pour le calcul d'itinéraires destiné au service d'urgence.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit dans un premiers temps le système d'urgence en France en général, et en particulier le service d'urgence SAMU/SMUR ainsi que les acteurs qui y interviennent.

Dans un deuxième temps, nous avons étudié les différentes phases qui peuvent influencer sur le délai pour la prise en compte des patients par le service d'urgence. Les problèmes étudiés sont liés à la localisation des lieux d'interventions, au positionnement et au repositionnement des véhicules d'urgences sur les sites d'attente et enfin à la recherche d'itinéraires. Cette étude est très importante afin de positionner nos travaux de recherche par rapport à toute la chaîne de prise en compte des patients par le service SAMU/SMUR. Enfin, nous avons présenté le contexte opérationnel de notre projet.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons à une thématique de recherche liée à la modélisation et à la gestion des objets mobiles. Une telle étude sera bénéfique pour pouvoir modéliser le plus

fidèlement possible l'historique des trajectoires du SAMU/SMUR lors de son intervention. Cette modélisation nous facilitera la tâche de l'estimation du temps de parcours.

Chapitre 2 Modélisation et gestion des données spatio-temporelles pour l'estimation du temps de parcours

Introduction

Au début de ce chapitre, nous allons présenter la notion générale de temps de parcours et les différentes techniques qui existent pour l'estimer. L'une de ces techniques sera retenue pour la réalisation de notre projet.

En deuxième lieu, nous décrirons deux familles de modélisation des données spatio-temporelles. La première se base sur les Types Abstraits de Données (TAD), la deuxième sur des modèles conceptuels. Notre idée de base dans un premier lieu est de pouvoir créer un modèle général des trajectoires des interventions du service d'urgence pour l'estimation du temps de parcours basé sur les TAD. Dans un deuxième lieu, nous traduirons ce schéma vers un modèle conceptuel. Nous estimons que cette traduction est très utile pour la compréhension de notre modèle surtout par les acteurs non informaticiens.

Enfin, nous décrirons deux systèmes de gestion des bases de données spatio-temporelles. L'un des deux sera retenu pour l'implémentation de notre modèle.

2.1 Etat de l'art des techniques de mesures du temps de parcours

De nos jours, l'information sur le temps de parcours est devenue indispensable pour la planification des déplacements et la sécurité des automobilistes. En France, en 1994, l'affichage du temps de parcours est apparu pour la première fois sur le périphérique parisien. A partir de cette date, l'information sur le temps de parcours s'est étendue sur les autoroutes et les voies rapides.

Dans cette section, nous présenterons dans un premier temps une définition générale et les différents types de temps de parcours. Dans un deuxième temps, nous décrirons les différentes techniques pouvant être utilisées pour estimer le temps de parcours.

2.1.1 Le temps de parcours : notion générale et typologie

La notion du temps de parcours pourra être définie de la façon suivante : c'est le temps de parcours d'un véhicule pour aller d'un point de départ A vers un point d'arrivée B. On en distingue deux familles: temps de parcours individuels et temps de parcours moyens (Certu, 2008).

Le temps de parcours individuel correspond au temps mis par un véhicule pour parcourir un itinéraire bien défini. Il est composé d'un temps de circulation et d'un temps d'arrêt. Un itinéraire pourra être décomposé en plusieurs tronçons. Ainsi, le temps de parcours sur cet itinéraire sera la somme des temps de parcours sur ces tronçons. Concernant le temps de parcours moyen sur un itinéraire, il correspond à la moyenne arithmétique des temps de parcours individuels dans une période de temps donnée. En effet, pour chaque famille de temps de parcours, on distingue deux sous types : le temps de parcours prévu et sortant. Le temps de parcours prévu ou entrant est le temps prévu pour qu'un véhicule se rende d'un point de départ A vers un point d'arrivée B. En revanche, le temps de parcours sortant est le temps réellement mis par un véhicule sur un itinéraire. En pratique, un temps de parcours prévu sur un itinéraire est généralement reconstitué à partir du temps de parcours sortant ou mesuré.

2.1.2 Techniques et exigences pour la mesure du temps de parcours

Dans le domaine routier, plusieurs techniques peuvent être utilisées pour estimer le temps de parcours. En vue de déterminer ce temps, on distingue plusieurs techniques telles que les véhicules traceurs, les radars, les capteurs aux sols, la lecture des plaques et la téléphonie mobile (Certu, 2008). Ces techniques peuvent être divisées en deux familles. La première est basée sur des mesures issues de détecteurs installés sur le réseau routier tels que les capteurs aux sols, les boucles magnétiques et les caméras. La deuxième se base sur des mesures issues de capteurs mobiles nommés véhicules traceurs (Certu., 2008). Afin d'améliorer la fiabilité de la mesure du temps de parcours, les mesures issues des deux techniques peuvent être fusionnées (El Fouzi., 2001).

En tant qu'exigences attachées à l'estimation du temps de parcours, les auteurs dans (certu, 2008) définissent quatre indicateurs : la couverture spatiale, la finesse spatiale, la couverture temporelle et la précision.

La couverture et la finesse spatiale pour un système de mesure du temps de parcours pourront être fixées selon la nature du projet. La couverture spatiale pourra être limitée par exemple sur les routes de types autoroutes ou encore sur des points critiques du réseau tels que les carrefours situés dans les zones urbaines. Quant à la finesse spatiale, elle désigne l'échelle considérée pour estimer le temps de parcours. Il pourra être un tronçon routier ou encore un itinéraire qui relie deux adresses.

La couverture temporelle dépend des périodes de temps (heure de la journée, période vacance / hors vacance, événements exceptionnels, etc..) où l'estimation du temps de parcours a été réalisée.

Enfin, la dernière exigence est liée à la précision et à la fiabilité des estimations des temps de parcours. Une marge d'erreurs tolérée pour l'estimation du temps de parcours sera fixée par le maître d'ouvrage. Dans la suite, nous présenterons une revue de la littérature sur l'utilisation des techniques basées sur des capteurs aux sols et sur des véhicules traceurs.

2.1.2.1 Par suivi de véhicules

La technique d'estimation du temps de parcours par véhicule traceur se base sur l'exploitation des mesures des vitesses issues de l'historique des trajectoires empruntées par ce véhicule. En vue de pouvoir utiliser cette technique, on pourra suivre la démarche suivante.

La première étape consiste à équiper un véhicule par un capteur par exemple un GPS. Dans la deuxième étape, on récupère les traces GPS des déplacements et on applique un filtre sur nos données qui consiste à éliminer les temps d'arrêts enregistrés au cours des déplacements.

La troisième étape concerne l'application d'un algorithme de map-matching. Le but de cette étape est de pouvoir projeter les traces GPS des déplacements sur les tronçons routiers. Il est donc possible de savoir pour un déplacement donné la route qu'il a empruntée. Enfin, par le biais de la base de données des déplacements appariés avec le réseau routier, il est possible de connaître le temps de parcours sortant d'un tronçon routier dans une période de temps.

Dans la littérature, plusieurs travaux utilisent cette technique comme outil de mesure du temps de parcours.

(Gendre et al., 2007) explique en détails les étapes à suivre pour pouvoir créer une base de données de temps de parcours à partir des traces GPS de déplacements d'un simple véhicule ou encore de transport en commun. Le but de ce rapport est d'expérimenter le processus de la création et l'analyse d'une base de données de temps de parcours sur le logiciel SIG GrfMap². Grâce aux fonctionnalités fournies par le logiciel, il est possible de calculer le temps de parcours moyen ou individuel à l'échelle d'un tronçon routier ou encore pour un itinéraire en fonction de la période de temps ou les moments de la journée. Cependant, l'auteur ne donne aucune indication sur le processus d'estimation du temps de parcours en cas d'absence d'observation (les routes qui ne sont pas empruntées par le véhicule). De plus la notion de la fiabilité n'est pas prise en considération dans l'analyse de la base de données des temps de parcours.

A la fin de son ouvrage, l'auteur propose des améliorations qui peuvent être apportées à ce logiciel telles que la connexion avec le système de gestion de la base de données PostGresQL/PostGis.

(Liu et al., 2009, Schaefer et al., 2002) utilisent les taxis comme véhicules traceurs. Les deux expérimentations ont été réalisées dans la ville de Nagoya au Japon, à Vienne et à Berlin. L'utilisation de ce type de véhicule a pour avantage d'assurer une couverture large du réseau routier. De plus, le coût de l'équipement de ces véhicules est très limité puisque les taxis sont déjà équipés par des systèmes de géo-localisation par satellites. (Liu et al., 2009) montrent que pour ce type de véhicule, il y a une concentration des trajets enregistrés sur certaines routes telles que celles qui relient les gares et les aéroports. En revanche, les auteurs ne donnent aucun élément pour évaluer les temps de parcours.

2 GrfMap : un logiciel SIG de gestion des bases de données de temps de parcours développé par la société ICIA Technologies

(Uno et al., 2009) utilisent les bus comme véhicules traceurs. Ils montrent que ces derniers estiment les temps de parcours plus pertinemment que d'autres types de « véhicule traceur », tels que les taxis, puisque les itinéraires empruntés par les bus sont bien définis (les trajets habituels des bus). Toutefois, les données de temps de parcours basé sur ce type de véhicule sont surestimées par rapport à la flotte des taxis. Ceci est dû à la détection des temps d'arrêts lors de leurs voyages. Pour résoudre ce problème, les auteurs proposent une méthode de correction qui consiste à éliminer le temps de stationnement des bus aux arrêts.

En effet, cette technique d'estimation du temps de parcours, cible une catégorie bien spécifique de véhicule. Afin d'avoir une meilleure représentativité statistique, la technique nécessite l'équipement d'un nombre suffisant de véhicules. Cependant, l'inconvénient majeur de cette technique est lié aux difficultés d'enregistrement des mesures par le système de géo-localisation par satellites. Ce type de problème peut arriver par exemple dans les zones disposant de bâtiments à hauteur élevée.

2.1.2.2 Basées sur des capteurs fixes

Cette méthode se base sur l'utilisation de mesures liées à l'infrastructure du réseau routier. Elle consiste à localiser des capteurs de trafic (par exemple électromagnétiques) sur les tronçons routiers. L'estimation du temps de parcours repose sur la conversion de données de trafic issues de ces capteurs. Pour plus de détail sur le processus de conversion des données trafic, le lecteur peut se référer au travail de (Bousquet., 2010).

Cette technique a été utilisée dans plusieurs travaux. En vue de trouver un meilleur itinéraire dans un contexte multimodal, (Bousquet., 2010) exploite les mesures issues des capteurs au sol comme technique pour estimer le temps de parcours. Dans le cas d'absence de capteurs sur les routes, l'auteur utilise une approche basée sur une technique par propagation spatiale. La technique consiste à propager les mesures issues de ces capteurs aux routes de même catégorie (autoroute ou route secondaire par exemple) en tenant compte de la proximité spatiale. L'expérimentation a été réalisée sur les voies rapides autour de Lyon (Figure 5).

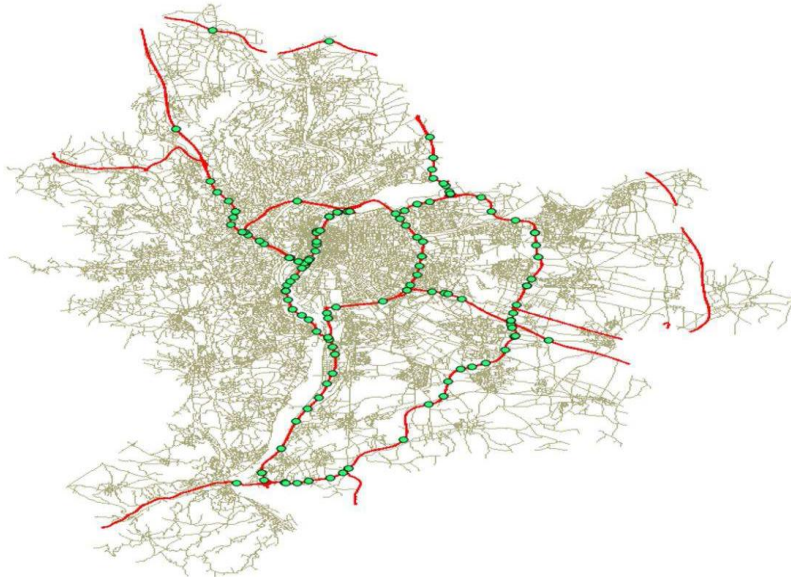


Figure 5 Installation des capteurs sur le réseau routier autour de Lyon (Bousquet., 2010)

Pour chercher un meilleur itinéraire selon le type de jour et l'heure de la journée, (Danech et al., 2007) proposent un algorithme de recherche où les estimations de temps de parcours se basent sur des mesures issues des capteurs fixes telles que le débit, la vitesse et le pourcentage de poids lourds.

L'avantage de cette méthode réside dans son utilité pour mesurer le temps de parcours moyen pour plusieurs véhicules. Cependant, elle nécessite un ensemble d'équipements considérable.

2.1.2.3 Par fusion des données

Afin d'améliorer la fiabilité, la couverture spatiale et temporelle de l'estimation du temps de parcours, la méthode par fusion des données peut être utilisée. Il s'agit de combiner les mesures issues des deux techniques présentées auparavant. Dans son rapport, (El Fouzi., 2001) propose un état de l'art très détaillé sur les méthodes principales de fusion des données. Parmi ces méthodes, on présente celle qui permet la fusion directe de différentes mesures issues des sources différentes. Etant donné qu'il existe plusieurs estimateurs de temps de parcours provenant de plusieurs sources, l'idée de base de l'auteur est de combiner ces estimateurs en un seul. Les procédures de fusion utilisées sont généralement de type « moyenne pondérée ». Un poids est accordé pour chaque estimateur permettant de refléter sa fiabilité.

Prenons par exemple plusieurs estimations du temps de parcours provenant de plusieurs sources $i=1, \dots, k$. On note par F_i l'estimateur du temps de parcours pour la i ème source.

L'estimateur cherché s'écrit donc comme une combinaison linéaire des k estimateurs F_i avec i, \dots, k :

$$H = \sum_{i=1}^k W_i F_i \quad \text{avec} \quad \sum_{i=1}^k W_i = 1.$$

Par conséquent, le problème de fusion peut être réduit à la recherche d'un coefficient de pondération W_i pour avoir une meilleure fiabilité de H .

2.2 Discussion et choix d'une technique d'estimation du temps de parcours

Suite à la présentation des différentes techniques d'estimation du temps de parcours, on peut conclure que la méthode par véhicule traceur est la plus adaptée dans l'estimation du temps de parcours pour le service d'urgence. En effet, cette technique est non seulement moins coûteuse mais aussi plus adaptée pour la réalisation d'études sur une catégorie spécifique de véhicule que les techniques basées sur des capteurs fixes.

Afin de mettre en œuvre cette technique, nous avons équipé d'un GPS l'unique véhicule du SMUR qui sert à effectuer les interventions primaires (figure 6).

Un premier protocole d'enregistrement des trajectoires des interventions est mis en place. Il consiste à allumer le GPS au début de l'intervention et l'éteindre à l'arrivée au lieu de l'intervention par les ambulanciers. Cependant, dans la phase de l'analyse de trajectoires récoltées, nous avons remarqué que le nombre de trajectoires n'est pas similaire à celui mentionné par le service d'urgence. De plus, nous avons constaté que dans plusieurs cas il manque des portions de déplacement du véhicule d'urgence. Ce protocole n'a pas fonctionné puisque dans la plus part des cas les ambulanciers sont occupés par le déroulement de l'intervention et oublient de mettre en marche le GPS. Pour résoudre ce problème, nous avons mis en place un deuxième protocole. Il consiste à brancher directement le GPS sur l'allume cigare. Une fois que le véhicule est en marche, le GPS commence l'enregistrement de sa position.



Figure 6 Véhicule d'urgence équipé par un GPS

Nous avons constaté que la problématique de l'estimation du temps de parcours par véhicule traceur n'est généralement pas abordée du point de vue de la modélisation et de la gestion des objets mobiles. Alors qu'un modèle général des trajectoires des déplacements pourrait être utilisé dans diverses applications. Par ailleurs, une modélisation fine de ces trajectoires est susceptible d'améliorer la fiabilité des estimations de vitesses de parcours. Dans cette optique, et dans la suite de ce chapitre, nous aborderons un axe de recherche lié à la modélisation et à la gestion des objets mobiles pour l'estimation du temps de parcours.

2.3 Etat de l'art sur la modélisation et la gestion des objets mobiles

Dans le domaine informatique, une base de données peut être définie comme étant un ensemble des données bien structurées et stockées dans un Système de Gestion de Base de Données (SGBD).

Avant de passer à la gestion des données au sein d'un SGBD, l'étape la plus importante est liée à la modélisation de ces données. Au sens des informaticiens, une telle modélisation permet de représenter le monde réel le plus fidèlement possible selon les cas d'études visés. La modélisation des données peut être vue comme étant une passerelle entre le monde réel et le monde informatique. Dans cette section, nous présentons deux approches pour la modélisation des objets mobiles : par des TAD et par une approche basée sur des modèles conceptuels.

2.3.1 La modélisation des données spatio-temporelles par TAD

La modélisation d'un objet spatio-temporel par TAD a été initialement définie dans (Erwing et al., 1999). L'idée essentielle pour laquelle les TAD sont conçus est de séparer l'utilisation de l'implémentation. Les TAD peuvent être évalués sur plusieurs critères tels que les opérations qui peuvent être appliquées sur ces types, le modèle choisi pour représenter l'évolution temporelle (continu ou discret) et l'approche adoptée pour définir ces types (Zheni et al., 2010). On en distingue deux catégories. La première permet l'analyse d'une trajectoire d'un objet mobile dont le déplacement est libre (Zheni et al., 2010, Güting et al., 2000), tandis que la seconde consiste à analyser les trajectoires des objets mobiles contraintes par un réseau physique, généralement routier ou ferroviaire (Sandu-Popa et al., 2009 ; Güting et al., 2006).

2.3.1.1 Modèle libre

Dans un modèle libre, la trajectoire d'un objet mobile est exprimée en fonction des positions absolues 2D ou 3D. Dans (Güting et al., 2000), de nouveaux types abstraits scalaires ou spatiaux variant dans le temps ont été définis, comme par exemple **moving (point)** pour un objet mobile (position 2D variant dans le temps) ou **moving (real)** pour représenter une valeur réelle variant dans le temps (figure 7).

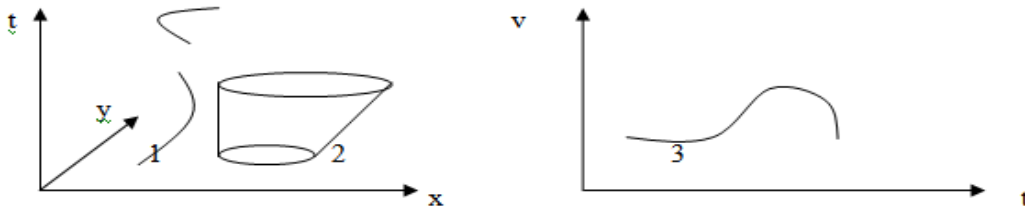


Figure 7 Représentation d'un point mobile (1), une région mobile (2) et réel mobile (3) (Guting et al., 2005)

Pour la gestion de ces types, les auteurs proposent de nouveaux opérateurs dont on cite à titre d'exemples :

- ✓ L'opérateur **trajectory** pour la projection dans le domaine spatial :

Trajectory (moving (point)) → ligne

L'opérateur **trajectory** reçoit comme paramètre d'entrée un objet de type **moving(point)** et il retourne un objet de type **ligne** (par exemple la trace d'une trajectoire empruntée par l'objet mobile).

L'opérateur **deftime** retourne un ensemble d'intervalles de temps pendant lesquels l'objet mobile est défini. Quant à l'opérateur **rangevalues**, il retourne un ensemble d'intervalles de valeurs (figure 8).

- ✓ L'opérateur **deftime** pour la projection et l'interaction dans le domaine temporel :

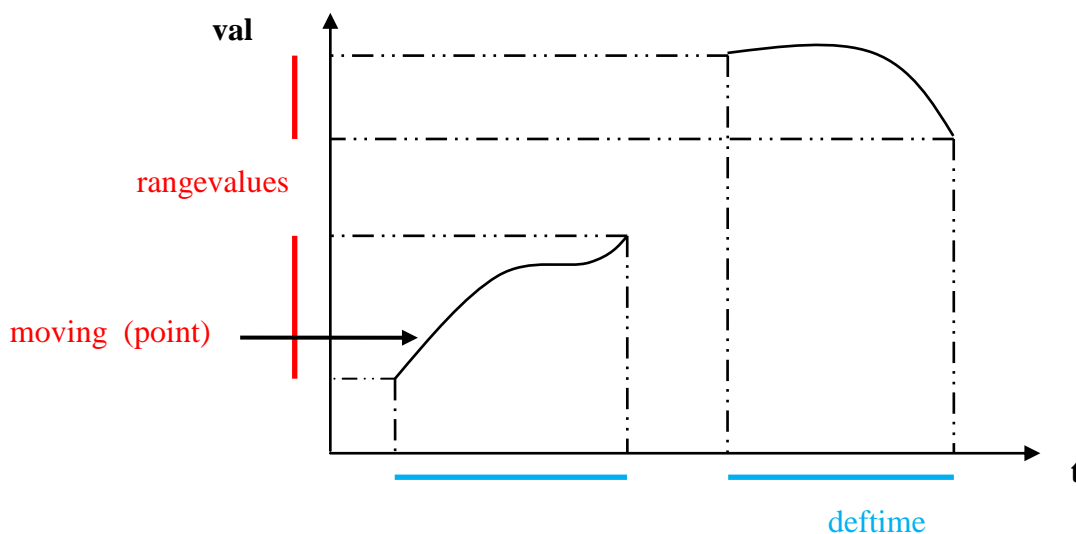


Figure 8 Exemple de projection du type moving(point) dans le domaine temporel

Nous présentons dans ce qui suit un exemple d'utilisation de l'opérateur **deftime**.

On considère le schéma des objets mobiles suivant :

```
Objet-mobile (id : int, trajectoire : moving(point))
```

avec « id » de type entier qui représente l'identificateur de l'objet mobile et trajectoire qui désigne le déplacement effectué par l'objet de type **moving(point)**.

Pour déterminer le temps de départ et d'arrivée d'un objet mobile donné, on pourra appliquer la requête SQL suivante :

```
Select min(deftime(trajectoire)),  
max(deftime(trajectoire)) from objet-mobile where  
id=&id ;
```

Dans cette section, nous avons présenté des types et des opérations abstraits pouvant être utilisés lors de la modélisation ou de l'extraction des informations issues des objets mobiles dans un modèle libre. Dans la section suivante, la même étude sera menée dans un modèle contraint.

2.3.1.2 Modèle contraint

Une trajectoire contrainte par un réseau (par exemple une route) peut être exprimée par ses positions relatives sur ce réseau. Modéliser un objet mobile en utilisant un modèle contraint permet la réduction de la dimensionnalité en transformant l'espace 2D du réseau en un espace 1D (Pfosser et al., 2003).

Dans (Güting et al., 2006), les auteurs proposent de nouveaux types abstraits dans le but de représenter un objet mobile qui se déplace sur un réseau en fonction du temps : **moving (gpoint)** et **moving (gline)** pour respectivement un objet de type « point » et une « ligne » mobile dont la position relative au réseau varie dans le temps.

Par ailleurs, le type **reseau** permet de modéliser un réseau routier sous la forme de routes et de jonctions entre ces dernières. Dans la suite, nous présentons seulement les structures et les opérations qui peuvent être appliquées sur les types **gpoint** et **moving (gpoint)**. Pour plus de détail sur les structures des types **gline** et **moving(gline)**, le lecteur peut se référer aux travaux de (Güting et al., 2006).

- **Gpoint** : retourne la position de l'objet relative au réseau.

```

gpoint : enregistrement
{
  Nid : entier (identificateur du réseau)
  Rid : entier (identificateur de la route)
  Pos : (position sur la route)
  Side : {vers le bas, vers le haut, aucun}
}

```



Opérations :

- route** : retourne le numéro de la route.
- pos** : position relative de l'objet.
- side** : côté de la route.
- shortest_path**: plus court chemin entre deux points.

- **Moving(gpoint)** : retourne la position de l'objet relative au réseau variant dans le temps.

```

moving=mgpoint : enregistrement
{
  Nid : entier (identifiant du réseau)
  Rid : entier (identifiant de la route)
  Side : {vers le bas, vers le haut, aucun}
  T1 : instant (instant de départ)
  T2 : instant (instant d'arrivée)
  Pos1 : entier (position de départ)
  Pos2 : entier (position d'arrivée)
}

```



opérations :

- trajectory** : retourne la trajectoire de l'objet.

Dans le but d'étudier la conduite naturelle, (Sandu-Popa et al., 2009) exploitent différentes mesures enregistrées lors d'une expérimentation lancée par l'INRETS telles que la vitesse du véhicule, la vitesse individuelle de chaque roue et la position de la pédale de freinage. Les auteurs évoquent plusieurs questions à résoudre :

- Q1 « Quel est le profil d'accélération le long d'un segment de route donné pour un trajet donné ? »
- Q2 « Quelle est la différence entre le profil de la vitesse observée et la vitesse légale le long d'un segment de route ? »
- Q3 « quel est le profil moyen d'accélération pour tous les véhicules qui traversent une section de route donnée ? »

L'idée principale du travail présenté dans (Sandu-Popa et al., 2009) repose sur l'enrichissement du modèle de (Güting et al., 2006) par de nouveaux types et de nouvelles opérations. Pour cela, deux nouveaux types abstraits sont définis : **gmoving(real)** (figure 9) et **smoving(real)** qui représentent un objet de type réel variant respectivement dans un espace contraint et libre. Les nouveaux types sont implémentés sous Oracle 11g.

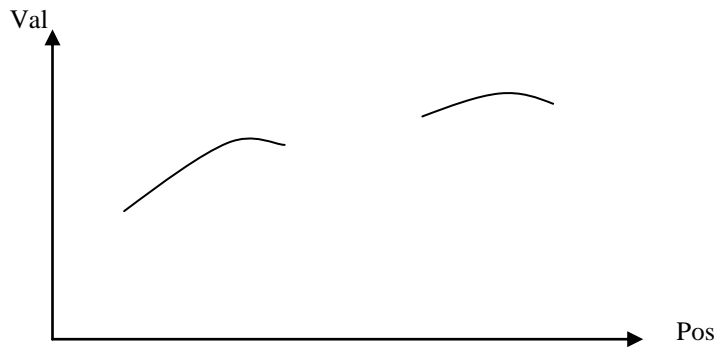


Figure 9 Exemple de profil spatial d'une valeur réelle (Sandu-Popa et al., 2009)

Afin de résoudre les questions déjà présentées, (Sandu-Popa et al., 2009) suggèrent un schéma contenant des informations ou des mesures liées aux déplacements des véhicules.

```
Vehicule_trip (mo_id : int, trip: moving(gpoint), g_speed:
gmoving(real), t_speed: moving (real)
g_acceleration: gmoving(real), t_acceleration: moving (real))
```

L'entité « Vehicule_trip » est caractérisée par les attributs suivants.

- **mo_id** : identifiant d'un véhicule.
- **trip** : la trajectoire spatio-temporelle d'un véhicule.
- **g_speed** : profil spatial de la vitesse
- **t_speed** : profil temporel de la vitesse
- **g_acceleration** : profil spatial de l'accélération
- **t_acceleration** : profil temporel de l'accélération

Q1 « Quel est le profil d'accélération le long d'un segment de route donné pour un trajet donné ? »

```
SELECT atgline(g_acceleration, &aGline)
FROM vehicle_trip
WHERE mo_id = &anID
```

On précise que L'opération **atgline** permet de retourner le profil de l'accélération longitudinale restreint au sous-espace indiqué par la géométrie de la route **aGline** donné en paramètre.

Q2) « Quelle est la différence entre le profil de la vitesse observée et la vitesse légale le long d'un segment de route ? ».

```
SELECT sub(g_speed, &legalSpeed)
From vehicule_trip where inside (trajectory(&legalSpeed),
trajectory(g_speed))=1
```

L'opérateur **Sub** retourne la différence entre deux profils de mesures de même nature, tandis que **trajectory** est un opérateur de projection dans le domaine spatial.

Q3 « Quel est le profil moyen d'accélération pour tous les véhicules qui traversent une section de route donnée ? »

```
SELECT avg_agg(g_acceleration)
FROM vehicule_trip
WHERE inside(trajectory(&aCurve), trajectory(trip))=1
```

L'opérateur **avg_agg** retourne le profil moyen d'accélération.

A partir des différentes requêtes présentées auparavant, on voit bien l'intérêt de la modélisation des trajectoires par le biais d'un modèle contraint. Grâce à ce type de modélisation, il est possible d'analyser finement les caractéristiques du déplacement d'un objet sur un réseau routier.

2.3.2 La modélisation des données spatio-temporelles par modèles conceptuels

Suivant l'institut ANSI (American National Standards Institute), la modélisation des données peut être réalisée en deux étapes : la première consiste à étudier et à analyser les besoins des utilisateurs, la deuxième est une succession de trois étapes, les niveaux conceptuel, logique et physique.

- Niveau conceptuel :

Le but visé par les informaticiens derrière un niveau conceptuel est de pouvoir schématiser le plus fidèlement possible le contenu de la base de données. Ce schéma est lié aux cas d'études visés et il est nommé « schéma conceptuel ».

Ce dernier doit être lisible et facile à comprendre par les différents profils d'utilisateurs. Il est indépendant du processus de stockage des données et il permet de décrire les types de données, les relations et les contraintes utilisées.

Actuellement, les modèles conceptuels les plus connus sont soit de type entité-association comme Merise (Tardieu, et al., 1986), soit de type orienté objet comme UML (Fowler, et al., 1998).

- Niveau logique :

Le niveau logique est un niveau intermédiaire entre le niveau conceptuel et le SGBD. L'objectif de ce niveau est de générer un schéma logique. Ce dernier est le résultat d'une transformation d'un schéma conceptuel d'un cas d'étude en suivant un modèle de données.

Généralement, le processus de la transformation d'un schéma conceptuel vers un modèle de données est automatisé. Le grand défi pour les informaticiens, lors de l'application de ce processus, est de préserver le plus possible la sémantique du schéma conceptuel du départ.

En effet, suivant la complexité des cas d'études, préserver la totalité de cette sémantique lors du passage vers un schéma conceptuel est presque impossible.

- Niveau physique :

On pourra définir le niveau physique comme étant la phase finale du processus de la modélisation des données. Cette étape se traduit par une transformation d'un schéma logique vers un schéma physique selon la syntaxe d'un SGBD choisi.

Dans le but d'avoir une performance au niveau de la gestion des données stockées dans un SGBD, le concepteur pourra intégrer d'autres structures physiques (par exemple la création des index permettant la réduction des temps de recherche).

Puisque notre projet s'inscrit dans un contexte spatio-temporel (modélisation des trajectoires des interventions réalisées par le service d'urgence), il nous est indispensable d'avoir recours à un modèle riche par les types spatiaux et /ou temporels qui nous permette la modélisation des trajectoires des véhicules d'urgence. Les modèles de type entité-association ou objet-association révèlent des insuffisances lors de la modélisation des données spatiales, temporelles ou spatio-temporelles étant donné que les types et les opérateurs ne sont pas conçus pour manipuler ce genre de données. Pour résoudre cette insuffisance, de nouveaux modèles sont apparus.

Dans la littérature, on distingue plusieurs modèles conceptuels des données spatio-temporelles qui sont fondés soit sur un modèle entité-association soit sur un modèle orienté objet. Dans les sections suivantes, nous présenterons un résumé sur ces modèles.

2.3.2.1 Les approches entité-association

Dans la catégorie des modèles conceptuels basés sur l'approche entité-association, on distingue MADS (Parent et al., 2006) et STER (Spatio-Temporal Entity-Relationship) (Tryfona et al., 1999).

- **MADS** (Parent et al., 2006) (Modeling of Application Data with Spatio-temporal features) est un modèle conceptuel enrichi par la structure orientée objet. Le modèle est le fruit du projet de recherche MurMur (MULti-Representations et Muli-Resolutions). Sous MADS, les dimensions spatiales, temporelles et spatio-temporelles peuvent être attribuées librement aux classes, attributs et associations. Le modèle permet d'affecter aux associations des contraintes spatiales et temporelles.

Outre la modélisation des données classiques (attributs de types numérique ou texte en particulier), MADS offre la possibilité de modéliser les données spatiales et temporelles.

➤ Modélisation des données spatiales

Pour modéliser la spatialité des objets, des attributs ou des associations, le modèle MADS fournit une hiérarchie très riche. La hiérarchie des types spatiaux a comme racine le type abstrait **geo** (figure 10). Elle peut être divisée en deux groupes de types :

Simple geo : c'est un type abstrait qui englobe tous les types spatiaux classiques tels que **Point**, **Ligne**, **Ligne orientée**.

Complex geo : c'est un type abstrait qui réunit tous les types complexes ou multiformes. On en cite comme exemple des types multiformes (**Complexe area** et **Point Bag**).

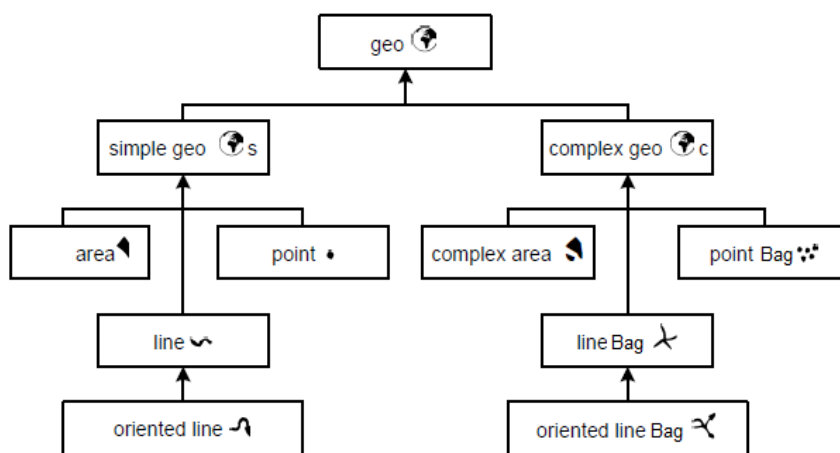


Figure 10 Hiérarchie des types spatiaux dans MADS (Parent, et al., 1997)

➤ Modélisation des données temporelles

Afin de gérer l'information temporelle, le modèle MADS fournit plusieurs types tels que **Time** qui est la racine hiérarchique (figure 11) des types **Simple Time**, **Instant**, **Interval**, **Complex Time**, **Instant Bag** et **Interval Bag**. Pour plus de détails sur ces types, le lecteur peut se référer à (Parent, 2006). (Zimanyi, 2006) définit un ensemble de méthodes et d'opérateurs visant à leur exploitation. Sur le type Time, plusieurs méthodes peuvent être appliquées tels que :

String calendar() : retourne le nom du calendrier de la valeur,

Boolean intersects(Time t) : retourne « True » s'il existe un instant d'intersection entre la valeur et le paramètre t.

Concernant les méthodes appliquées sur le type Instant, on cite par exemple les deux méthodes suivantes:

weekday dayOfWeek() : retourne le jour de la semaine,

Month monthOfYear() retourne le mois de l'année,

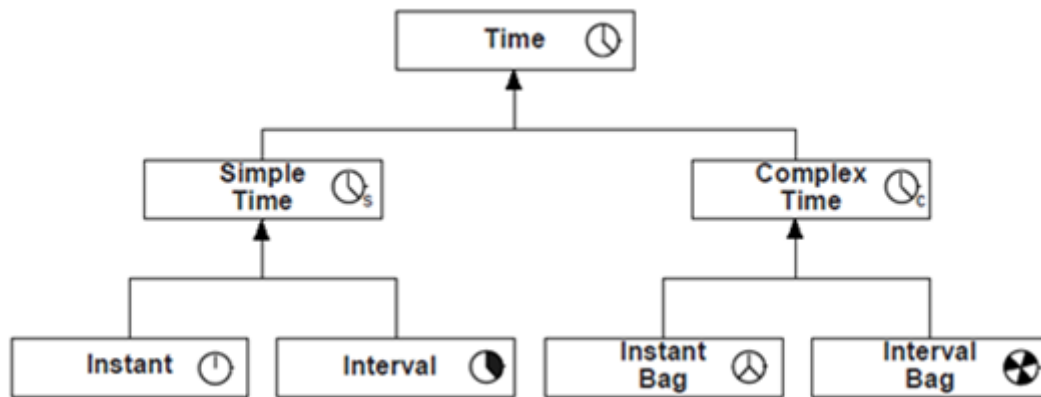


Figure 11 Hiérarchie des types temporels dans MADS (Parent, et al., 1997)

- **STER** (Spatio-Temporal Entity-Relationship) (Tryfona, et al., 1999).

STER est un modèle conceptuel basé sur l'approche entité-association. Il utilise les trois types de base : Point, Ligne et Région pour gérer l'information spatiale (figure 12). Concernant l'information temporelle, le modèle propose un seul type « Période ». De plus, il ne propose aucune hiérarchie des types spatiaux et temporels. Le Modèle prend en considération le temps de validité et de transaction. Le temps de validité correspond aux valeurs des types temporels saisies dans la base de données. (Dumas, 2000) précise que, généralement, les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) utilisent ce type de temps. Le temps de transaction pourra être défini comme étant le temps où les informations sont enregistrées dans la base de données. Il est à noter que le modèle STER n'assure pas l'orthogonalité entre les concepts.

| Point | Ligne | Région | Temps de validité | Temps de transaction |
|-------|-------|--------|-------------------|----------------------|
| P | L | R | et | tt |

Figure 12 Pictogrammes du modèle STER (Tryfona, et al., 1999)

2.3.2.2 Les approches orientées objet

Dans la littérature, on distingue plusieurs modèles de conception des données spatio-temporelles basées sur une approche orientée objet. Dans cette catégorie, on va détailler les modèles conceptuels les plus reconnus.

- **STUML** (extended SpatioTemporal UML) (Price, et al., 2000)

C'est un modèle conceptuel des données spatio-temporelles basé sur une extension de la méthodologie UML. Pour représenter les données thématiques, spatiales ou temporelles, le modèle propose cinq nouveaux pictogrammes (figure 13).

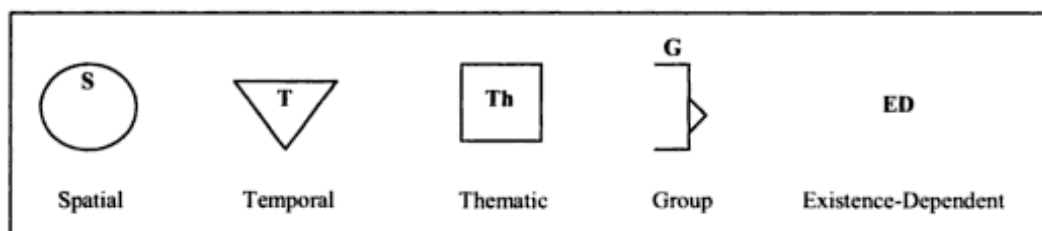


Figure 13 Les pictogrammes du modèle STUML (Price, et al., 2000)

Le concepteur a la possibilité de combiner des pictogrammes qui ont des caractéristiques spatiales et temporelles pour la représentation des données spatio-temporelles. Il pourra aussi affecter cette combinaison à l'ensemble des attributs, aux associations ou aux différentes classes du modèle. Par contre, le modèle STUML ne permet pas d'attribuer des contraintes spatio-temporelles entre les différents objets du modèle. De plus, ce formalisme n'offre aucune hiérarchie des types spatiaux et temporels.

- **Perceptory** (Bedard, 1999)

C'est un modèle de conception des données spatio-temporelles basé sur une extension du formalisme UML. Pour représenter les données spatio-temporelles, les auteurs de Perceptory utilisent la notion de « stéréotype » en prenant les PVL (Plug-ins for Visual Language) comme outils. Ensuite, ces PVL sont traduits sous la forme de pictogrammes (figure 14).






| Point | Ligne | Polygone | Instant | Période |
|---|---|---|--|---|
|  |  |  |  |  |

Figure 14 Pictogrammes à caractéristiques spatiales et temporelles de Perceptory (Bedard, 1999)

Dans Perceptory, la dimension spatiale est gérée par le biais des types point, ligne et polygone, tandis que la dimension temporelle est gérée par le type instant et période.

Le modèle ne permet pas d'attribuer des contraintes spatio-temporelles entre Les différents objets du modèle. De même que le modèle STUML, aucune hiérarchie des types spatiaux et temporels n'est proposée.

-Profils-UML :(Miralles, 2005)

De même que STUML et Perceptory, Profils-UML est un modèle de conception des données spatio-temporelles basé sur une extension du formalisme UML. En effet, ce modèle est très inspiré de Perceptory. L'innovation du modèle réside dans la possibilité de modéliser les données imprécises. Comme Perceptory, ce modèle ne permet pas d'attribuer des propriétés spatio-temporelles aux associations qui relient les différents objets.

- GeoFrame-T (GEOgraphic FRAMEwork- Time) (Rocha, et al., 2001)

Ce modèle permet la modélisation des données classiques, spatiales, temporelles et spatio-temporelles. Le modèle tient compte de la différence entre les données spatiales selon qu'elles sont continues ou discrètes (figure 15).




| Non spatial | Spatial continu | Spatial discret |
|---|---|---|
|  |  |  |

Figure 15 Pictogrammes qui caractérisent une donnée spatiale ou non (Rocha, et al., 2001)

En plus de la modélisation des données spatiales ou thématiques, le modèle permet la conception de données purement temporelles. Pour cela, les concepteurs de ce modèle définissent les types Instant

(TemporelInstant), Period (TemporelInterval) et l'union entre le type Instant et Period (TemporelElement).

Le modèle ne permet pas l'attribution des relations spatio-temporelles aux associations du modèle.

D'autres modèles de conception des données spatio-temporelles basés sur une approche orientée objet ne sont pas détaillés dans cette section. A titres d'exemples, on cite GeoOOA (Kosters, et al., 1997) et POLLEN (Procédure d'Observation et de Lecture de L'Environnement) (Gayte, et al., 1997).

2.3.3 Etudes sur les SGBDR spatiaux temporels

Une fois l'étape de la modélisation des données spatio-temporelles achevée, il est fortement logique de faire un tour d'horizons sur les différents SGBD spatiaux et/ou temporels existants. De nos jours les SGBD les plus répandus sont soit de types relationnels (SGBDR), objets (SGBDO) et relationnels objets (SGBDRO). Dans notre projet, nous orientons vers les SGBDR. Nous détaillerons seulement les SGBDR Hermes et la cartouche spatiale PostGis. On précise toutefois qu'il existe d'autres cartouches spatiales comme par exemple celle d'Oracle.

- Hermes

Hermes, parue en 2006 (Pelekis, 2006 et Pelekis, 2007), est une framework spatio-temporelle qui a été développée sous Oracle 10g. Le but du développement de cette extension est de faciliter la modélisation et l'interrogation des objets mobiles (position et / ou forme qui varie en fonction du temps). Sous Hermes, les types sont répartis en quatre catégories : les types de base, spatiaux, temporels et les types spatio-temporels (figure 16).

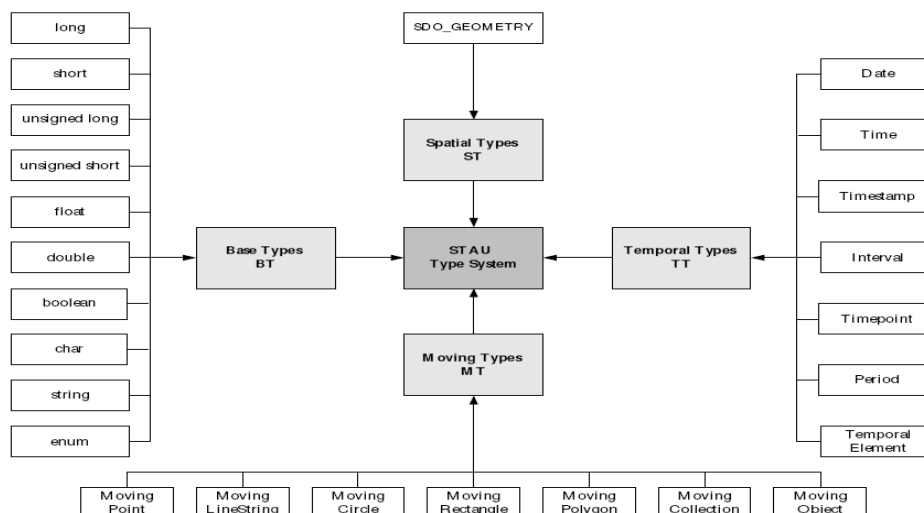


Figure 16 Répartition des types sous Hermes (Pelekis, 2007)

Outre les types de base déjà proposés par Oracle, Hermes propose les types suivants.

➤ Les types spatiaux :

Hermes fournit des types purement spatiaux. Ces derniers sont déjà proposés par Oracle Spatial.

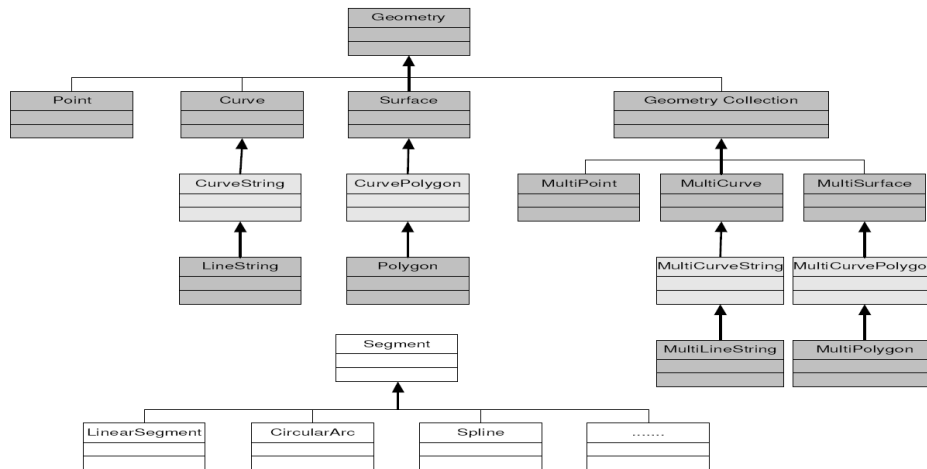


Figure 17 Hiérarchie des types spatiaux sous Oracle Spatial

Dans la hiérarchie des types spatiaux proposés par Oracle Spatial (figure 17), on distingue deux groupes qui héritent du type abstrait Geometry (type mère de la hiérarchie) :

- ✓ Des types simples (point, ligne, polygone...etc),
- ✓ Des types complexes ou multiformes (MultiPoint, MultiSurface).

➤ Les types temporels :

Tous les types temporels d'Hermes ont été proposés dans TAU-TLL (Pelekis, 2002) qui se base sur une extension présentée dans (Kakoudakis, 1996). Les types qui y sont définis sont : **Date**, **Time**, **Timestamp** et **Interval**.

TAU-TLL enrichit cette extension par d'autres types temporels tels que : **Timepoint**, **Period** et **Temporelement**.

➤ Les types spatio-temporels :

Afin de faciliter la gestion de l'historique des positions d'un objet mobile (dont la forme et/ ou la position varie en fonction du temps), Hermes propose de nouveaux types spatio-temporels.

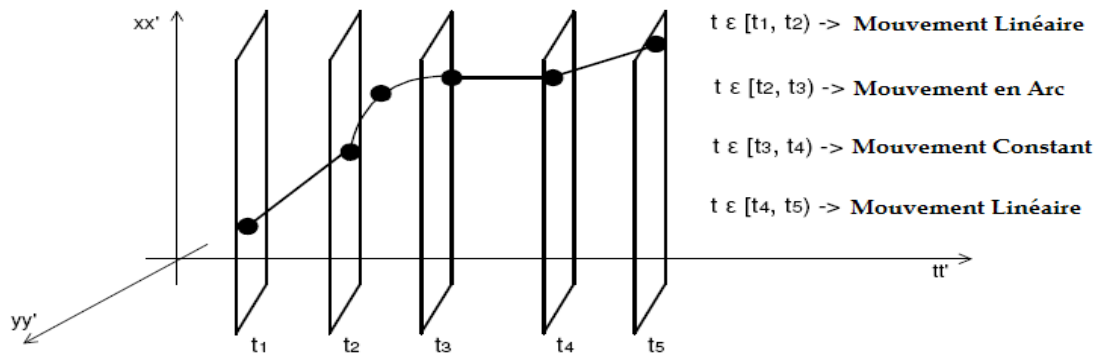


Figure 18 Représentation en tranches et types de mouvement d'un point mobile (Boulahya, 2009)

Sous Hermes, une trajectoire d'un objet mobile pourra être représentée sous la forme de tranches (par exemple mouvement linéaire, mouvement en arc, mouvement constant et mouvement linéaire) (figure 18).

La représentation se fait dans un repère à trois dimensions (xx' , yy' , tt'). Chaque tranche pourra être définie par une fonction simple.

La représentation d'un objet mobile se fait par le biais du type « **unité mobile : umpoint** ». Ce dernier permet la description du comportement de l'objet sur une tranche bien spécifique. Pour concevoir ce type, les concepteurs de Hermes ont défini deux autres types **D_Period_Granule** et **Unit_Fonction**.

Le type **D_Period_Granule** représente la période du temps écoulé lors du mouvement de l'objet, et cela suivant le type de la granularité (heure, minute ou seconde).

Le type **Unit_Fonction** est essentiel pour modéliser le type du mouvement. Il reçoit comme paramètres d'entrée trois réels (a, b et c) pour construire la fonction.

Hermes supporte plusieurs types de fonction : constante, premier degré et deuxième degré. D'autres fonctions pourront être ajoutées grâce à l'extensibilité de la fonction **Unit_Fonction**.

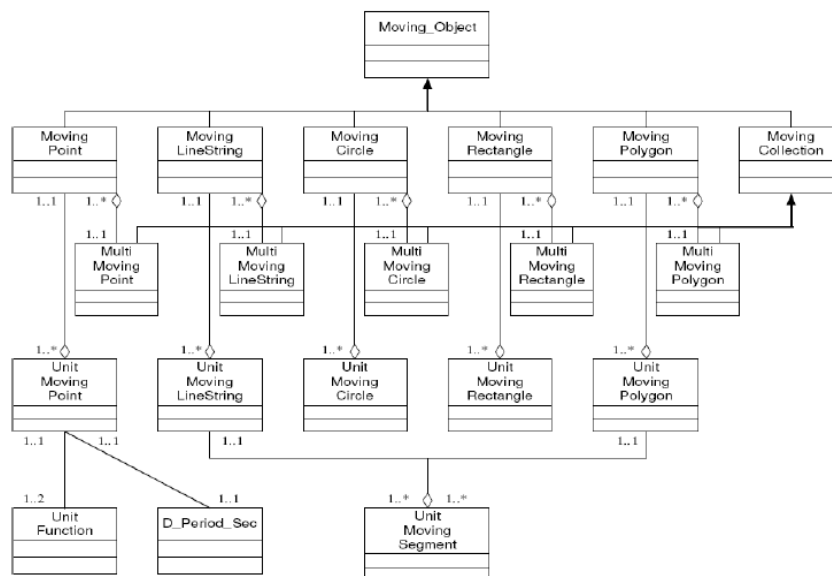


Figure 19 Diagrammes des classes des types d'objets mobiles sous Hermes

Récemment, une migration d'Hermes vers Postgis a été présentée dans (Suleman, 2009).

- PostGis :

PostGis est la cartouche spatiale de PostgreSQL. Toutes les fonctionnalités fournies par cette cartouche reposent sur deux APIs :

- L'API **Geometry Engine Open Source (GEOS)** développée en c++ fournit toutes les fonctionnalités nécessaires pour la gestion des objets de type spatial.
- L'API **PROJ.4** développée en c est nécessaire pour la projection des données spatiales.

La cartouche fournit une hiérarchie très riche de types spatiaux. Tous les types spatiaux tels que les types **Point**, **Ligne**, **Polygone** et **Multipoint** héritent de la classe mère **Geometry**.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons choisi la technique d'estimation du temps de parcours la plus adaptée à notre contexte. Afin de modéliser les trajectoires des interventions effectuées par le service d'urgence, deux familles de modélisation ont été présentées. La première famille se base sur des TAD, la deuxième sur un modèle conceptuel. L'objectif d'avoir étudié ces deux familles est de pouvoir traduire un schéma conceptuel basé sur des TAD vers un modèle conceptuel. Nous estimons que ce passage est susceptible de faciliter la compréhension de notre modèle. Pour la gestion des données spatio-temporelles, nous avons présentés deux SGBD relationnels : la cartouche spatiale PostGis et la framework Hermes. Dans le chapitre suivant, nous présenterons notre démarche ainsi que son implémentation pour enrichir une base de données routière par des estimations de vitesses de parcours.

Chapitre 3 Une démarche pour enrichir une base de données routière par des estimations de vitesses de parcours

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons notre démarche pour enrichir une base de données routière par des estimations de vitesses de parcours. De plus, nous décrivons notre schéma conceptuel des trajectoires des interventions basées sur des TAD. Par ailleurs, nous réalisons sa traduction vers un modèle conceptuel. Pour avoir une meilleure estimation de vitesses de parcours, ce dernier sera enrichi par deux méthodes : directe et indirecte. Cette dernière nous permet d'avoir une valeur de vitesse de parcours pour des tronçons même en cas d'absence d'observations.

3.1 Questions et réflexions

Afin de bien mener notre étude, nous essayons dans ce chapitre de répondre aux questions suivantes :

- Comment modéliser la trajectoire d'un objet mobile dans le but de renseigner un réseau routier par des estimations de vitesses de parcours : avec un modèle contraint, libre ou avec un autre modèle ?
- Quelle méthode doit-on adopter pour apparier les segments de trajectoire avec les segments routiers suivis : avec la méthode incrémentale, globale ou en utilisant une autre méthode ?
- Quelle approche doit-on adopter pour avoir une meilleure estimation de vitesses de parcours ?
- Quel type abstrait faut-il utiliser pour exprimer la variation temporelle d'un attribut de type réel dans une période, catégorie de jours et tranches horaires bien définies : un type existant **moving(real)** ou **gmoving(real)** ou un autre type à créer ?

3.2 Un modèle libre modifié pour les trajectoires des interventions

Pour modéliser un objet mobile basé sur des TAD, nous distinguons deux modèles : libre et contraint. Dans un modèle libre, un objet mobile est exprimé en fonction de ses positions, tandis que dans un modèle contraint, un objet mobile est exprimé en fonction de ses positions relatives par rapport au réseau routier (section 2.3.1).

Dans notre projet, nous avons fait le choix d'adopter un modèle libre historique modifié : la trajectoire est exprimée en fonction des positions absolues en 2D tout en gardant la relation avec le réseau

physique par le biais du processus d'appariement (figure 20). Il s'agit d'un modèle historique puisque notre problématique consiste à sauvegarder et à analyser la totalité des trajectoires empruntées par le SMUR en post-traitement. L'argument qui nous a motivé pour adopter un modèle libre est la conservation de la forme réelle des trajectoires fournissant des renseignements sur le type de conduite des ambulanciers (dépassement, circulation sur la bande d'arrêt d'urgence, manœuvres consécutives à un encombrement de la circulation) et permettant d'expliquer certaines valeurs de vitesses observées au cours du déplacement, ainsi que la possibilité de corriger les erreurs d'appariement.

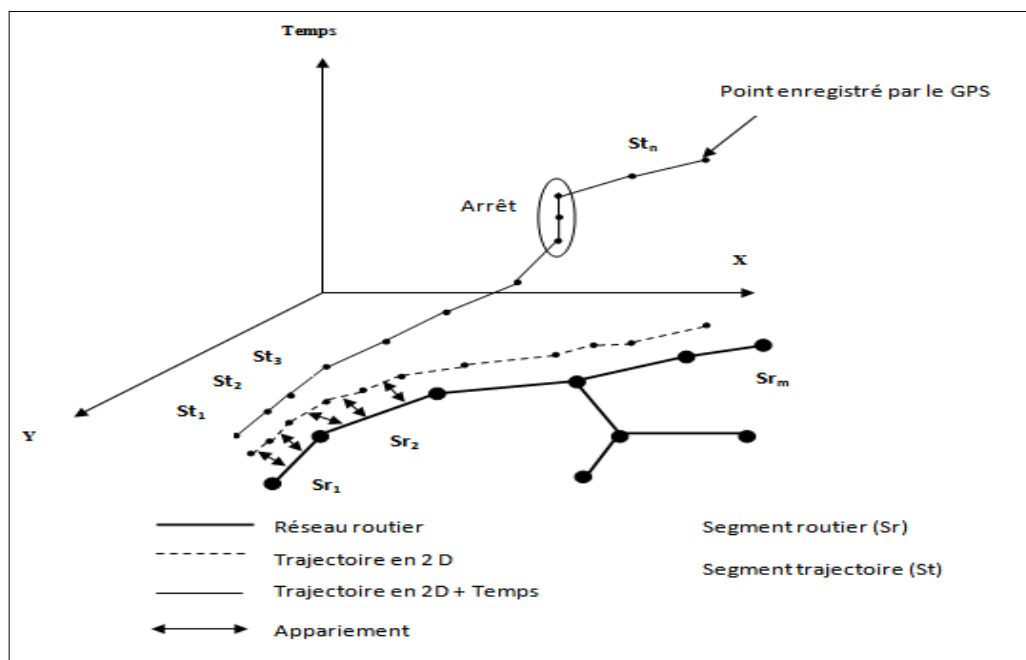


Figure 20 Modèle historique libre modifié

Pour la création de la base de données des trajectoires des interventions, nous exploitons les trames GPS issues du récepteur équipant un véhicule du SMUR. Le GPS est paramétré de façon à avoir un enregistrement toutes les 2 secondes. Un processus de filtrage est appliqué sur les différentes trajectoires : il sert à éliminer des points aberrants dus aux pertes du signal GPS et des trajectoires autres que les trajets vers le lieu d'intervention.

La trajectoire d'une intervention sera découpée en plusieurs tronçons. Chaque tronçon sera délimité par deux enregistrements successifs du GPS. Ensuite, on attribuera une vitesse pour chaque tronçon. Elle sera la vitesse observée lors du premier enregistrement appelé encore « top GPS ».

Dans la (figure21), on présente la trajectoire d'une intervention découpée en n tronçons.

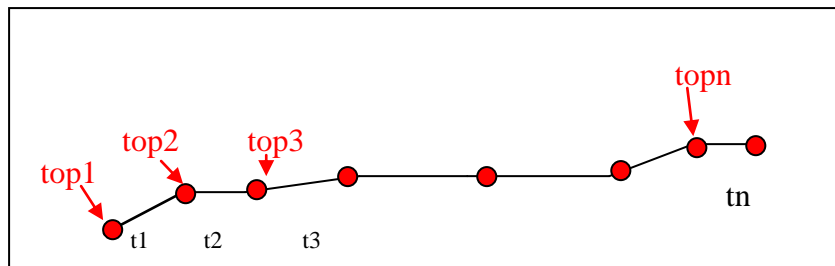


Figure 21 Découpage d'une trajectoire en plusieurs tronçons

La vitesse accordée au tronçon « t1 » sera la vitesse observée dans top1 et enregistrée par le GPS. Il en est de même pour les autres tronçons, dont « t2 » pour lequel on attribuera la vitesse enregistrée dans le top2. Nous montrons dans la section suivante l'intérêt de ce découpage pour l'amélioration du processus d'appariement. De plus, nous avons enrichi les trajectoires des interventions par des données liées au contexte de l'intervention (degré de gravité, diagnostic, conducteur, et date et heure de prise en charge du patient par le service d'urgence).

Après avoir créé notre base de données des trajectoires, l'étape qui suit dans notre méthodologie consiste à associer à chaque tronçon de trajectoire le tronçon routier emprunté par le véhicule d'urgence. Afin de réaliser cette tâche, nous faisons appel à un processus d'appariement des trajectoires avec le réseau routier. Dans la section suivante, nous présentons une définition générale, le domaine d'utilisation et les différentes mesures qui peuvent être utilisées dans le processus d'appariement. De plus, nous décrivons la méthode d'appariement adoptée dans notre contexte.

3.3 Appariement des données géographiques

3.3.1 Définition générale et domaines d'utilisation du processus d'appariement

Nous pouvons définir l'appariement comme étant le processus de mise en correspondance des objets géographiques qui représentent la même réalité (Olteanu , 2008). Le processus d'appariement peut être utilisé dans plusieurs applications : évaluation de la qualité, recalage, mise à jour des données géographiques et localisation des véhicules en temps réel ou différé sur un réseau routier.

De nos jours, l'information géographique est utilisée dans diverses applications ou études telles que l'aide à la navigation, la réalisation des plans d'aménagements ou encore pour les études de risques naturels. Il est à noter que la qualité des informations géographiques est capable d'influer directement sur la fiabilité de ces applications. Afin d'évaluer la qualité de cette information, le processus d'appariement peut être utilisé. L'idée de base consiste en premier lieu à mettre en correspondance les données géographiques de la base de données à évaluer avec celles issues de la base de données qui va jouer le rôle de référence. En deuxième lieu, un processus de comparaison des objets géographiques est appliqué en se basant par exemple sur leurs formes et leurs positions (Bel Hadj., 2001).

Une deuxième façon pour améliorer la qualité géométrique des données géographiques consiste à recalcr ou superposer deux jeux de données pour une même zone géographique (figure 22). Ce recalage est réalisé par l'identification des points homologues dans les deux sources de données. L'identification des points homologues est effectuée par le biais de l'application du processus d'appariement.

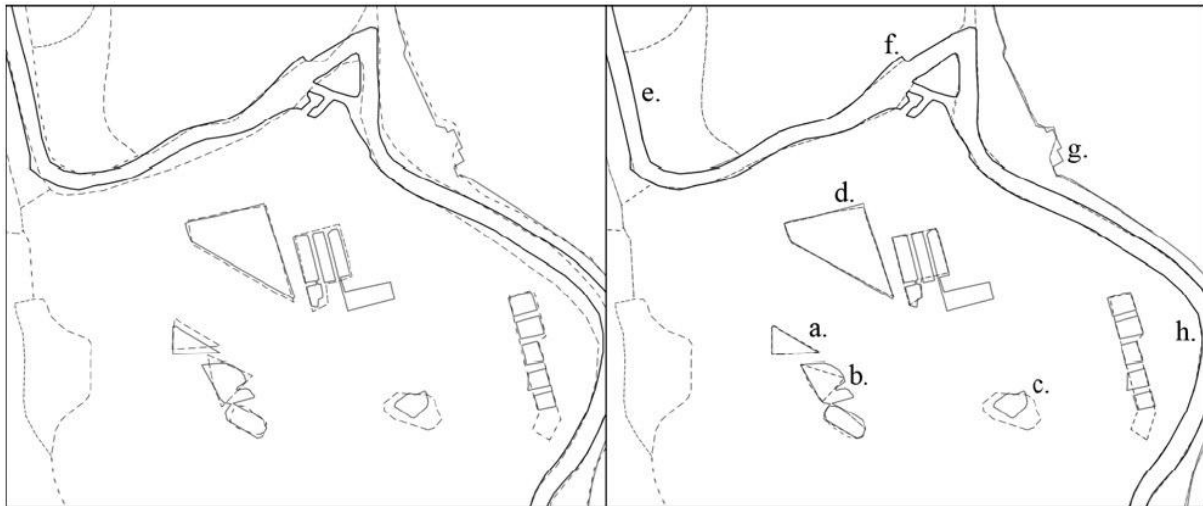


Figure 22 Superposition de deux sources de données (à gauche source initiale et à droite recalée) (Oltaneau., 2008)

De plus, l'appariement est une étape primordiale pour la mise à jour des données géographiques. Supposons que l'on dispose de trois bases de données d'une même zone géographique. Soient BDG-ref celle qui joue le rôle de référence côté utilisateurs de données géographiques, BDG-ref-MAJ la base de données de référence mise à jour et BDGU une base de données côté utilisateurs (figure 23). Pour pouvoir mettre à jour cette dernière, il faut en premier lieu déterminer les objets géographiques mis à jours dans la BDG-ref-MAJ. Cette tâche pourra être réalisée grâce à l'étude d'appariement entre la BDG-ref et la BDG-ref-MAJ. En deuxième lieu, ces objets seront intégrés dans la BDGU (Badar , 2000).

Le dernier domaine d'application du processus d'appariement concerne la localisation des véhicules en temps réel ou en post-traitement sur un réseau routier. Dans ce contexte, le processus d'appariement est nommé « map-matching ». Dans la suite de notre étude sur les différentes techniques du « map-matching », on se limitera seulement aux méthodes utilisées en post-traitement. En effet, notre seul intérêt dans notre étude est d'analyser l'historique des trajectoires.

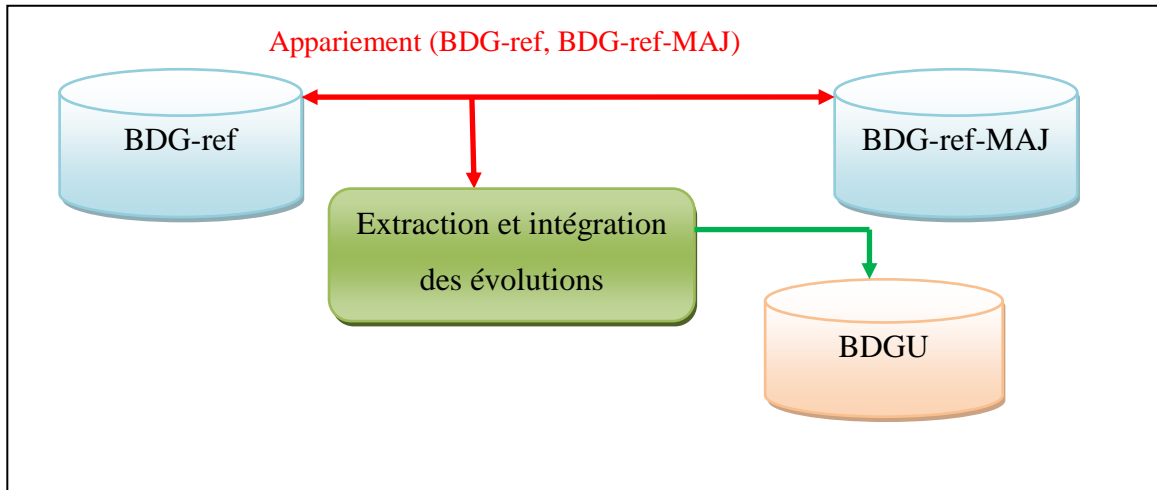


Figure 23 Mise à jour des données géographiques par le biais du processus d'appariement

3.3.2 Le map-matching, un cas particulier d'appariement

Dans cette section, nous présenterons deux techniques illustrées dans la littérature pour réaliser respectivement un « map-matching » entre deux objets géographiques de type ligne ou entre deux objets de types ligne et point.

3.3.2.1 Présentation des techniques du map-matching

(Mustière et al., 2008) ont étudié l'appariement des objets géographiques de type ligne de deux jeux de données à des niveaux de détail différents. Leur approche consiste à exploiter la géométrie et la topologie des objets géographiques. Pour pouvoir appairer les arcs issus de deux jeux de données, les auteurs utilisent les nœuds. Leur approche se compose de six étapes :

- La première étape s'articule autour de la conversion des objets géographiques de types ligne et point vers une structure de graphe avec arcs et nœuds.
- La deuxième étape concerne le pré-appariement des nœuds. Pour chaque nœud de la source de données la moins détaillée S1, on cherche les nœuds candidats à l'appariement dans la source de données la plus détaillée S2 (figure 24 à gauche). Les nœuds candidats se trouvant à une distance euclidienne inférieure à un seuil fixé auparavant sont sélectionnés.

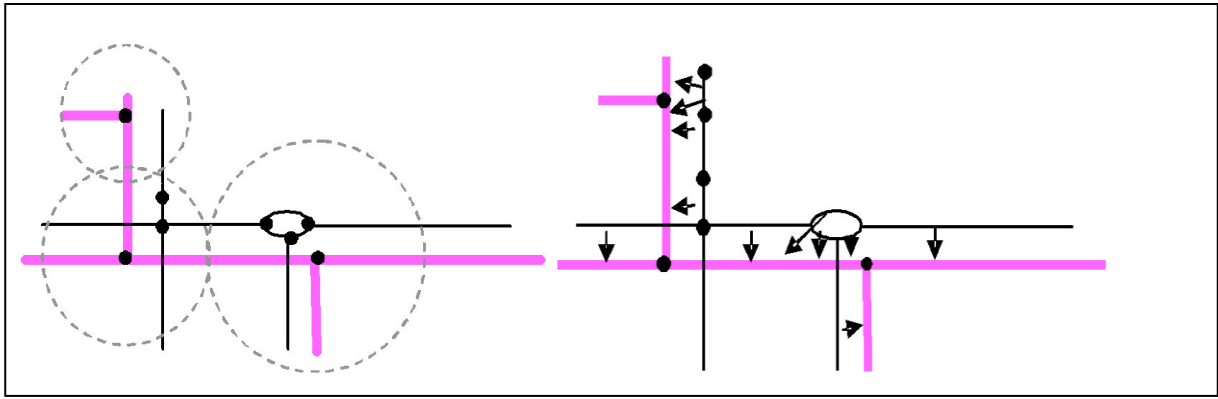


Figure 24 Pré-appariement des nœuds à gauche et pré-appariement des arcs à droite
(Mustière et al., 2008)

- La troisième étape est liée au pré-appariement des arcs (figure 24 à droite). Pour chaque arc de jeu de données S2 le plus détaillé, on détermine les arcs candidats dans le jeu de données S1 le moins détaillé. Les arcs candidats se trouvent à une distance inférieure à un seuil fixé. La distance utilisée par les auteurs est celle de la demi-distance de Hausdorff.

- Dans la quatrième étape, les auteurs s'intéressent à l'analyse des nœuds et des arcs pré-appariés. Par conséquent, pour chaque nœud du jeu de données S1 le moins détaillé, on analyse chaque nœud candidat du jeu de données S2 le plus détaillé. Ensuite, et selon les arcs pré-appariés, chaque nœud du jeu de données S2 sera qualifié par nœud « complet », « incomplet » ou « impossible ». La figure 25 située à gauche permet de distinguer deux types de cardinalité (1 : 1) et (1 : n). La cardinalité (1 : 1) veut dire qu'un nœud du jeu de données S1 le moins détaillé est apparié avec un seul nœud du jeu de données S2 le plus détaillé. Cependant, la cardinalité (1 : n) signifie qu'un nœud du jeu de données S1 le moins détaillé est apparié avec un ou plusieurs nœuds du jeu de données S2 le plus détaillé.

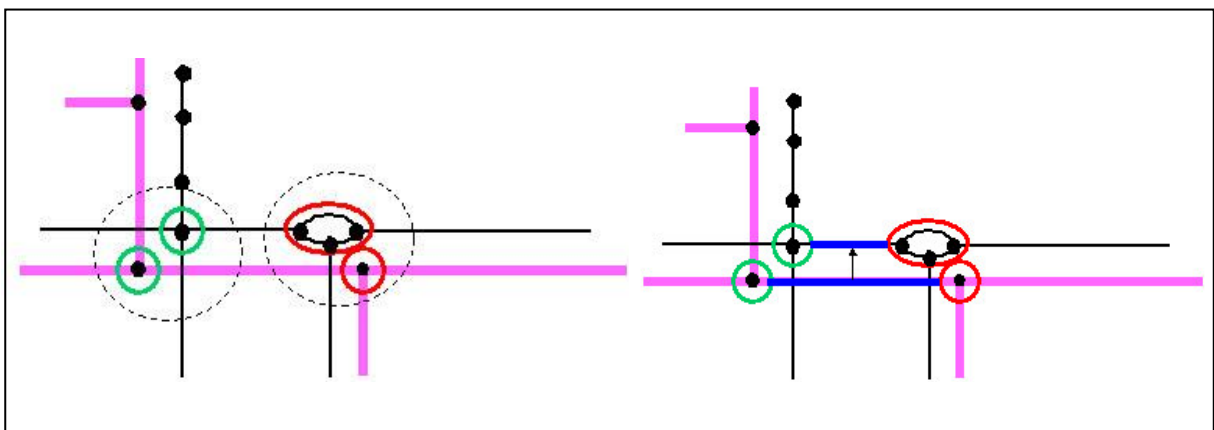


Figure 25 Appariement des nœuds à gauche, et appariement des arcs à droite
(Mustière et al., 2008)

- La cinquième étape consiste à appairer les arcs de deux jeux de données S1 et S2. Chaque arc du jeu de données S1 sera donc apparié à un arc de S2 qui est le plus court chemin reliant les deux nœuds appariés avec les extrémités de l'arc de S1. La qualification des arcs est liée à celle des nœuds. Les auteurs proposent deux types de qualification : « certain » ou « incertain ». Dans la figure 25 à droite, on observe une cardinalité de type (1 : 1) qui signifie qu'un arc du jeu de données S1 est apparié à un seul arc de S2.

- La dernière étape de l'approche est basée sur l'évaluation du processus d'appariement. Dans le cas où l'arc de S1 est apparié à un seul arc de S2, il est alors évalué « certain ». Dans le cas contraire, il est évalué « incertain ».

Dans le processus du map-matching, les jeux de données à comparer ont le même niveau de détail. Bien que le processus d'appariement présenté dans (Mustière et al., 2008) concerne la comparaison des jeux de données à niveau de détails différents, il est possible de l'appliquer dans notre contexte. Connaissant la trace d'une trajectoire empruntée par un véhicule, le processus de « map-matching » consiste à déterminer pour chaque tronçon de trajectoire le tronçon de route qui est suivi par le véhicule.

La deuxième technique du processus du map-matching concerne la localisation d'un objet géographique de type point sur un objet géographique de type ligne. Dans (Brakatsoulas et al., 2005), les auteurs proposent un algorithme incrémental de map-matching. Cette méthode consiste à appairer un point à un segment, l'appariement se faisant point par point (figure 26). Cet algorithme est nommé incrémental puisque pour appairer un point p_i , il faut avoir apparié le point précédent p_{i-1} .

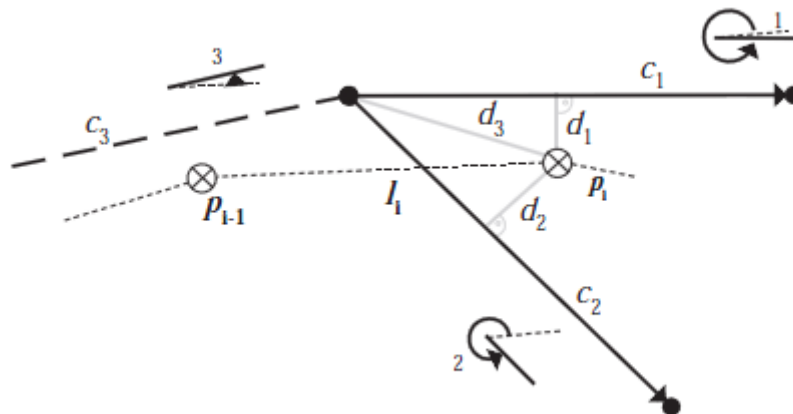


Figure 26 Méthode de map-matching incrémentale (Brakatsoulas et al., 2005)

Pour un point donné à appairer, les auteurs utilisent deux mesures S_d et S_α (présentées ci-dessous) pour évaluer les arcs candidats. La mesure S_d reflète la distance entre le point à appairer et les différents arcs. La mesure S_α est une fonction de l'angle entre la direction de l'arc candidat et celle du segment joignant les deux points P_i et P_{i-1}

$$s_d(p_i, c_j) = \mu_d - a \cdot d(p_i, c_j)^{n_d}.$$

$$s_\alpha(p_i, c_j) = \mu_\alpha \cdot \cos(\alpha_{i,j})^{n_\alpha}.$$

D'une part, $\mu(d)$ et $\mu(\alpha)$ représentent les facteurs d'échelle, et d'autre part, $n(d)$ et $n(\alpha)$ représentent les facteurs de puissance. Si $\mu(d)$ est supérieur à $\mu(\alpha)$, alors la mesure de la distance S_d a plus de poids que la mesure S_α représentant l'orientation. Concernant le facteur de puissance $n(d, \alpha)$, il sert à diminuer les poids issus respectivement de la mesure de la distance et de la différence d'angle.

Afin de calculer la distance $d(p_i, c_j)$ entre le point à apparier et l'arc routier candidat, les auteurs utilisent deux possibilités : si le point est situé au milieu des deux extrémités, la distance sera égale à sa projection orthogonale sur l'arc. Sinon, on considérera la distance entre ce point et l'extrémité la plus proche. Pour chaque arc candidat, ces deux mesures sont à déterminer. L'arc qui possède la somme (S) la plus élevée des deux mesures sera retenu.

$$s = s_\alpha + s_d.$$

3.3.2.2 Mesures utilisées dans le processus du map-matching

Plusieurs mesures peuvent être utilisées lors de l'appel du processus de « map-matching », en particulier celles de la distance euclidienne, de Hausdorff et la demi-distance de Hausdorff (Oltaneu, 2008).

La distance euclidienne est utilisée pour mesurer l'écart de position entre deux objets géographiques de type « point ». Soient deux objets A et B de type « point ». La distance entre A et B est définie comme ci-après :

$$d_{(A,B)} = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2}$$

Concernant la distance de Hausdorff, elle représente la distance maximale entre deux objets géographiques de type « ligne ».

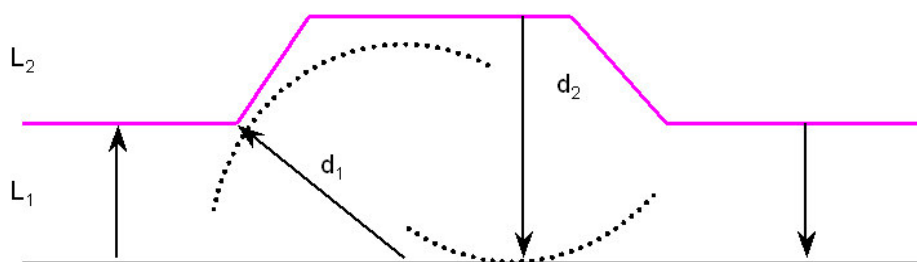


Figure 27 Mesure de la distance de Hausdorff entre deux lignes (L1, L2) (Oltaneu., 2008)

La distance de Hausdorff entre les deux lignes L1 et L2 présentées dans la figure 27 peut être formulée de la façon suivante (Oltaneu., 2008) :

$$d_H = \max(d1, d2).$$

d_1 et d_2 sont définies comme ci-dessous :

$$d_1 = \max_{p1 \in L1} \left[\min_{p2 \in L2} [d_e(p1, p2)] \right]$$
$$d_2 = \max_{p2 \in L2} \left[\min_{p1 \in L1} [d_e(p2, p1)] \right]$$

Dans le cas où la longueur de L1 est différente de celle de L2, l'écart maximal entre ces deux lignes sera porté sur les extrémités. Afin de pouvoir mesurer l'écart maximal dans ce cas entre L1 et L2, on pourra uniquement utiliser la première composante (d_1) de la distance de Hausdorff. Il s'agit de la demi-distance de Hausdorff.

3.3.2.3 Discussions et choix de la méthode du map-matching

Dans la section précédente, nous avons présenté deux familles de techniques pour la réalisation du « map matching ». La première se base sur l'appariement de deux arcs, tandis que la deuxième concerne l'appariement d'un point à un arc.

La méthode d'appariement présentée dans (Brakatsoulas et al., 2005) semble plus utile dans le cas où l'on veut apparier des positions GPS avec les tronçons routiers. Or, Notre idée est d'avoir un modèle libre modifié comme dit dans la section 3.2 et donc de conserver la trace des itinéraires (par interpolation entre les différents enregistrements du GPS). Nous estimons que cette représentation nous facilite la détection des manœuvres consécutives dues à un encombrement de circulation ou encore lors d'un changement brutal d'itinéraire. En conséquence, notre problème de « map matching » s'oriente vers l'appariement des arcs. Pour résoudre ce problème, nous avons adopté la technique présentée dans (Mustière et al., 2008) avec quelques modifications que nous estimons utiles pour la problématique d'estimation du temps de parcours.

Afin d'avoir une meilleure estimation du temps de parcours, nous avons découpé les trajectoires des interventions en plusieurs tronçons. Chacun sera délimité par deux positions enregistrées par le GPS. Le problème de « map-matching » sera formulé de la façon suivante : pour chaque tronçon trajectoire, on cherchera le tronçon routier suivi.

Dans notre cas, la cardinalité des liens du map-matching sera (1 : n) : un tronçon routier est apparié à un ou plusieurs tronçons trajectoires (figure 28). Pour la réalisation du « map-matching » entre les trajectoires des interventions et le réseau routier, nous avons suivi les étapes suivantes :

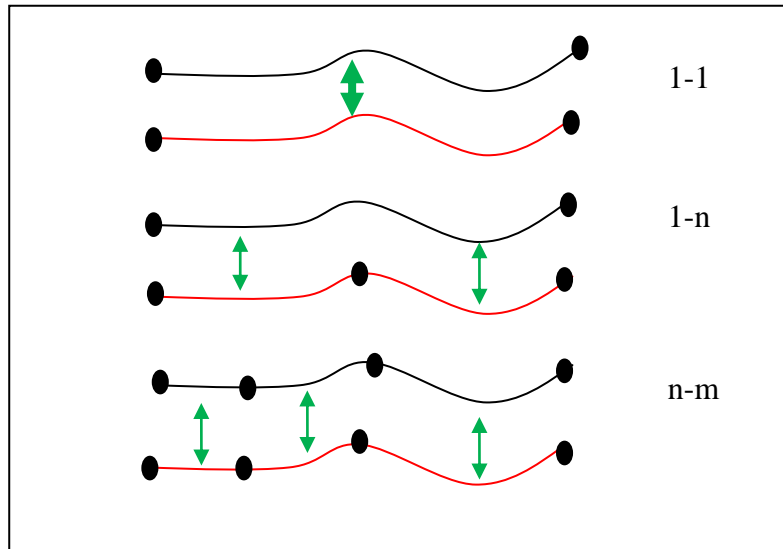


Figure 28 Cardinalités des liens du map-matching

- La première étape consiste à convertir les objets géographiques de types ligne et point vers une structure de graphe (arcs et nœuds).
- La deuxième étape est basée sur la fixation d'une distance de tolérance d'appariement. Au delà de cette distance, les arcs ne doivent pas être appariés. Cette tolérance est fixée selon l'erreur estimée du GPS. On précise que dans cette étape, la mesure d'appariement retenue est celle de la distance de Hausdorff. Dans notre contexte opérationnel, nous avons constaté que les erreurs d'enregistrements des déplacements du véhicule d'urgence ne dépassent pas les quatre mètres. En conséquence, seuls les tronçons trajectoires ayant une distance de Hausdorff maximale de quatre mètres les séparant des tronçons routiers seront appariés.
- Dans la troisième étape, et pour chaque nœud détecté sur la trajectoire, nous créons son homologue sur l'arc routier le plus proche par une projection orthogonale. Cette opération est répétée pour les nœuds détectés sur les routes. Grâce à cette étape, nous améliorons la précision de la mesure de la distance de Hausdorff entre les arcs des trajectoires et les routes. Dans la figure 29, nous présentons une partie d'une trajectoire où on a projeté ces nœuds sur les arcs routiers les plus proches.

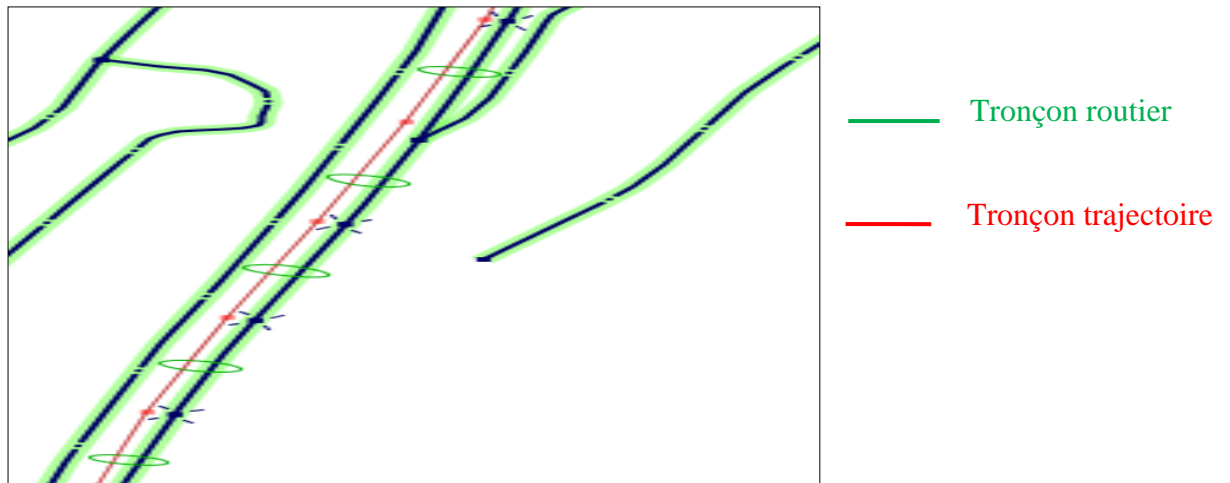


Figure 29 Appariement d'une trajectoire au réseau routier

- Lors de la quatrième étape, nous réalisons une comparaison entre la distance de tolérance fixée auparavant et la mesure de la distance de Hausdorff entre les arcs des trajectoires et les arcs routiers. Dans le cas où la mesure de la distance de Hausdorff entre les arcs des trajectoires et les arcs routiers est inférieure au seuil, l'arc trajectoire sera qualifié de « certain ». Dans le cas contraire, il sera qualifié d'« incertain ».

En réalité, le processus du « map-matching » est loin d'être parfait. Les erreurs observées sont généralement dues à la mauvaise réception des signaux par le GPS. Ceci peut être causé par des activités ionosphériques, des obstacles comme les bâtiments dont la hauteur est très élevée ou encore les conditions météorologiques. Pour pouvoir améliorer la fiabilité du processus du « map matching », on procède manuellement. Chaque arc de trajectoire qualifié d'« incertain » sera traité à part. On précise que ce type de correction est réalisé grâce à notre modèle des trajectoires où on a gardé leurs formes réelles.

3.4 Stratégie d'enrichissement de la base de données routière

Dans cette section, nous présenterons dans un premier temps une étude des différents facteurs pouvant influencer sur la trace d'une trajectoire. Nous fixerons alors les facteurs à retenir pour l'estimation de vitesses de parcours. Dans un deuxième temps, nous décrirons notre méthode générale pour cette dernière tâche.



Figure 30 Localisation d'une trajectoire empruntée par le véhicule d'urgence du SMUR
(Le Mans)

Le suivi de la trajectoire d'un objet mobile par un GPS sur un réseau routier peut être influencé par plusieurs facteurs. La figure 31 résume les principaux facteurs pouvant avoir une influence sur le suivi ou le choix d'une trajectoire dans un contexte d'urgence. On en distingue six catégories susceptibles d'être en interactions : celles liées au SMUR (A), au GPS (B), au domaine temporel (C), au domaine routier (D), à la circulation (E) et à la météorologie (F).

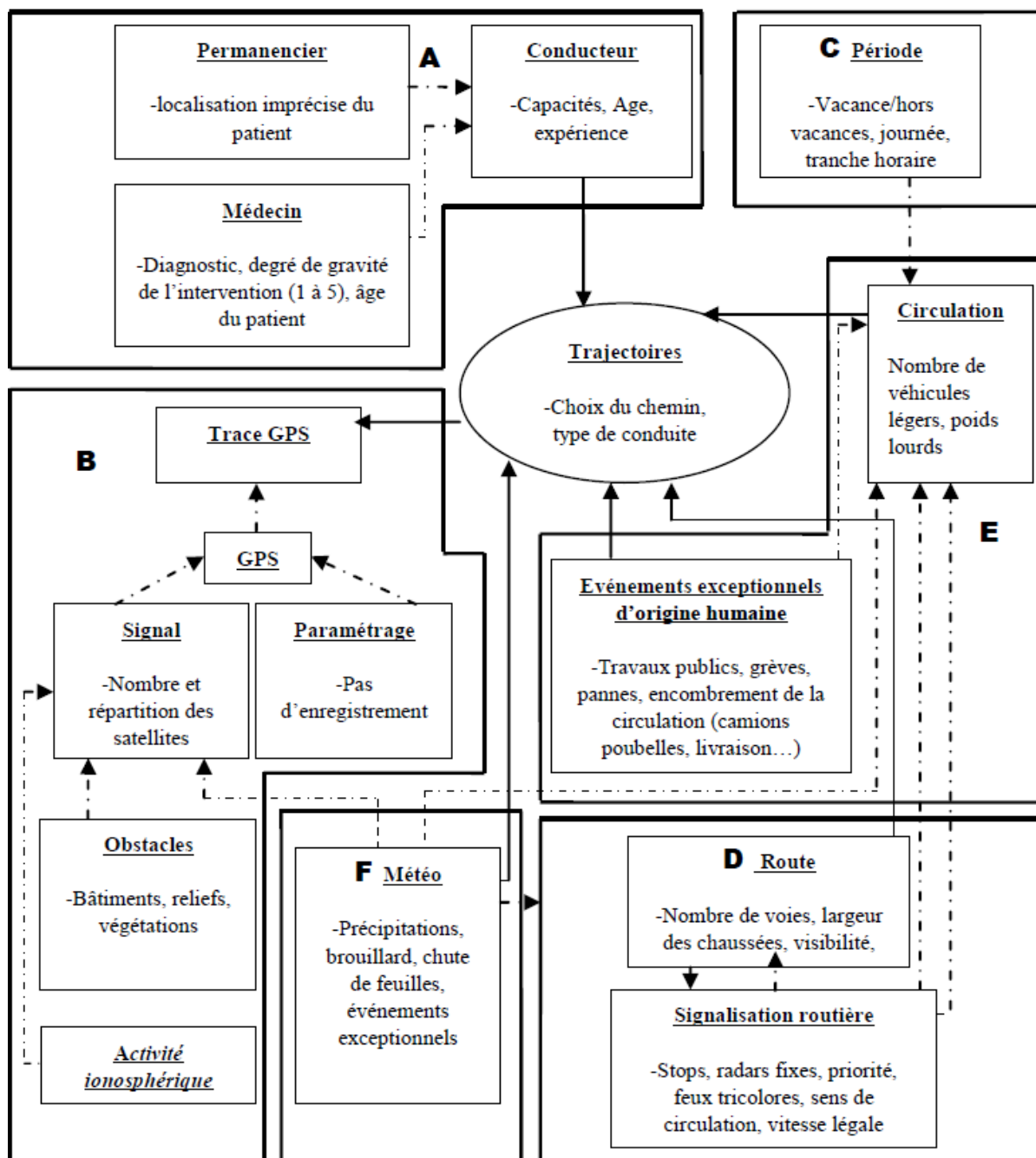


Figure 31 Les facteurs pouvant influencer la trace d'une trajectoire

Notre hypothèse de départ est la suivante : le choix d'un itinéraire par les ambulanciers est influencé par des facteurs temporels tels que la période (vacances/hors vacances), la catégorie de la journée (en cours ou en fin de la semaine) et le moment de la journée. En effet, ces facteurs ont une incidence directe sur la fluidité du trafic. Suite à des entretiens avec plusieurs ambulanciers, nous avons dégagé les périodes, les catégories de jours et les tranches horaires les plus importantes à étudier car elles correspondent aux « pics » de circulation (tableau 1). Pour la période des grandes vacances scolaires (en été), nous avons une seule catégorie couvrant toute la journée (tranche horaire 0h-23h59).

Le dimanche est traité de la même façon quelque soit la période d'observation. Etant donné que notre idée consiste à implémenter un algorithme temporel de recherche d'itinéraires, il est nécessaire de compléter les tranches horaires présentées dans le tableau 1 et correspondant aux périodes de forte circulation. Ceci est dans le but de couvrir totalement les journées avec les périodes de moindre circulation.

| Période | Catégories de jours | Tranches horaires |
|---------------------------|---------------------|---------------------------------|
| Hors vacances | Lundi-vendredi | (7h-9h) (11h30-14h) (16h30-19h) |
| | Samedi | (13h-21h) |
| Petite vacances scolaires | Lundi-Vendredi | (16h30-19h) |
| | Samedi | (13h-21h) |

Tableau 1 Les périodes, catégories de jours et les tranches horaires correspondant aux pics de la circulation

Concernant le processus d'estimation de vitesses de parcours, nous nous limitons aux facteurs liés à l'infrastructure du réseau routier (nombre, largeurs et importance des routes,...etc.), aux périodes d'observation (les tranches horaires) et les signalisations routières (présence ou pas des feux tricolores sur les tronçons routiers). Quant aux facteurs liés aux événements exceptionnels prévus et imprévus, le trafic et les conditions météorologiques, ils seront pris en considération en temps réel. En effet, notre idée consiste à proposer une architecture pour la prise en compte de la perturbation du trafic en temps réel (Cet aspect sera décrit plus en détail dans le dernier chapitre).

En France, plusieurs organismes ou établissements produisent, entretiennent et diffusent des données routières qui sont soit propriétaires soit libres. Les données propriétaires sont fournies par les organismes suivants : IGN (Institut Géographique National), Téléatlas et Navteq.

En plus des données propriétaires, le projet OpenStreetMap fournit une base de données routière librement utilisable pour le monde entier.

Pour des raisons de disponibilité, les données routières de L'IGN seront retenues afin de mettre en œuvre notre projet. On précise que le réseau routier du département de la Sarthe (zone d'étude) contient environ 133455 tronçons routiers.

Dans l'étude de l'impact des signalisations (feux tricolores) sur la variation des vitesses observées au cours des interventions, nous utiliserons les données issues du projet OpenStreetMap.

Notre stratégie d'enrichissement de la base de données routière par des mesures des vitesses observées peut être réalisée de deux façons : selon une méthode directe ou indirecte (figure 32). Dans le cas où nous n'avons pas assez d'observations enregistrées, nous appliquons des règles de décisions basées sur les classes des différents facteurs ayant un impact sur la variation des vitesses observées sur les trajectoires des interventions. Dans les prochaines sections, nous détaillerons chaque méthode.

3.4.1 Enrichissement par méthode directe

Avant d'enrichir directement notre base par les estimations de temps de parcours, nous allons évaluer une condition et ceci pour chaque tronçon routier. Il faut avoir un nombre de passages supérieur ou égal à N où N désigne le nombre de trajectoires qui empruntent un tronçon routier dans une période de temps ou tranche horaire bien définie. La valeur N peut être ajustée en fonction du nombre de passages que l'on juge suffisant pour obtenir des données représentatives, et du volume de données disponibles. On se limite dans notre étude à quatre périodes ou tranches horaires d'observations : « 7h - 9h », « 11h30 - 14h », « 16h30 - 19h » et le reste de la journée.

Par conséquent, si la condition définie auparavant est vérifiée, la vitesse estimée sur ce tronçon routier sera la moyenne de tous les tronçons (délimités par deux enregistrements successifs du GPS) de trajectoires qui empruntent ce tronçon routier. L'incertitude de la vitesse moyenne observée sur le tronçon routier sera déterminée en récupérant directement l'écart type. Dans le cas où notre condition n'est pas vérifiée, et pour estimer la vitesse sur ce tronçon, on fait appel à la méthode d'enrichissement indirecte. On précise que l'enrichissement par méthode directe se fait par l'appel de la méthode **Enrichissement_direct** ().

3.4.2 Enrichissement par méthode indirecte

La méthode d'enrichissement indirecte est utilisée dans le cas où la condition de la première méthode n'est pas vérifiée (le nombre de trajectoires est inférieur à un seuil fixé auparavant). Pour résoudre ce problème, on va créer des arbres de décisions pour l'estimation du temps de parcours. Les règles de décisions seront basées sur les différents facteurs retenus telles que les tranches horaires et les caractéristiques physiques du réseau routier comme la largeur des chaussées, le nombre de voies, etc. Enfin, après avoir créé les règles de décisions, on pourra déterminer la vitesse estimée sur un tronçon routier « T » et dans une tranche horaire « h » par l'application de l'équation (1) :

$$(1) \text{ Vitesse}_{T_h} = \frac{((\text{NboT}_h \times \text{vitesse_moy_troncon}_h) + (\text{NboR}_h \times \text{vitesse_moy_règles}_h))}{(\text{NboT}_h + \text{NboR}_h)}$$

- **NboT** : nombre de trajectoires qui empruntent le tronçon routier T et dans la tranche horaire h.
- **Vitesse_moy_troncon** (en km/h) : vitesse moyenne observée sur le tronçon routier T et dans la tranche horaire « h »,
- **NboR** : nombre de trajectoires observées dans la création de la règle de décision et dans la tranche horaire « h »,
- **Vitesse_moy_règles** (en km/h) : vitesse moyenne observée dans la classe d'appartenance de ce tronçon et dans la tranche horaire « h ».

L'équation (1) prend en compte la vitesse observée sur le tronçon routier et celle de sa règle d'appartenance en pondérant davantage la première valeur.

Comme pour la méthode d'enrichissement directe, l'incertitude sera mesurée par l'écart type de la vitesse T . Pour cela, on applique l'équation (2) :

$$(2)\sigma_{vitesseT} = \sqrt{\text{var}(vitesseT)} = \sqrt{\left(\frac{NboT}{NboR + NboT}\right)^2 \sigma_{vmoyt}^2 + \left(\frac{NboR}{NboT + Nbor}\right)^2 \sigma_{vmoyr}^2}$$

Il est à noter que, quelque soit la méthode d'enrichissement, l'incertitude qui caractérise de parcours sur un tronçon routier dans une tranche horaire sera déterminée par l'application de l'équation (3) :

$$(3)\sigma_t = \sqrt{\frac{d^2}{v^4} \sigma_{vitesseT}^2}$$

d (en mètre) : longueur totale du tronçon routier T ,

v (en km/h) : vitesse moyenne observée sur le tronçon routier T ,

$\sigma_{vitesseT}$ (en km/h) : écart-type de la vitesse moyenne observée sur le tronçon routier T .

Pour chaque tronçon routier et dans chaque tranche horaire étudiée, on aura donc un temps de trajet et son incertitude.

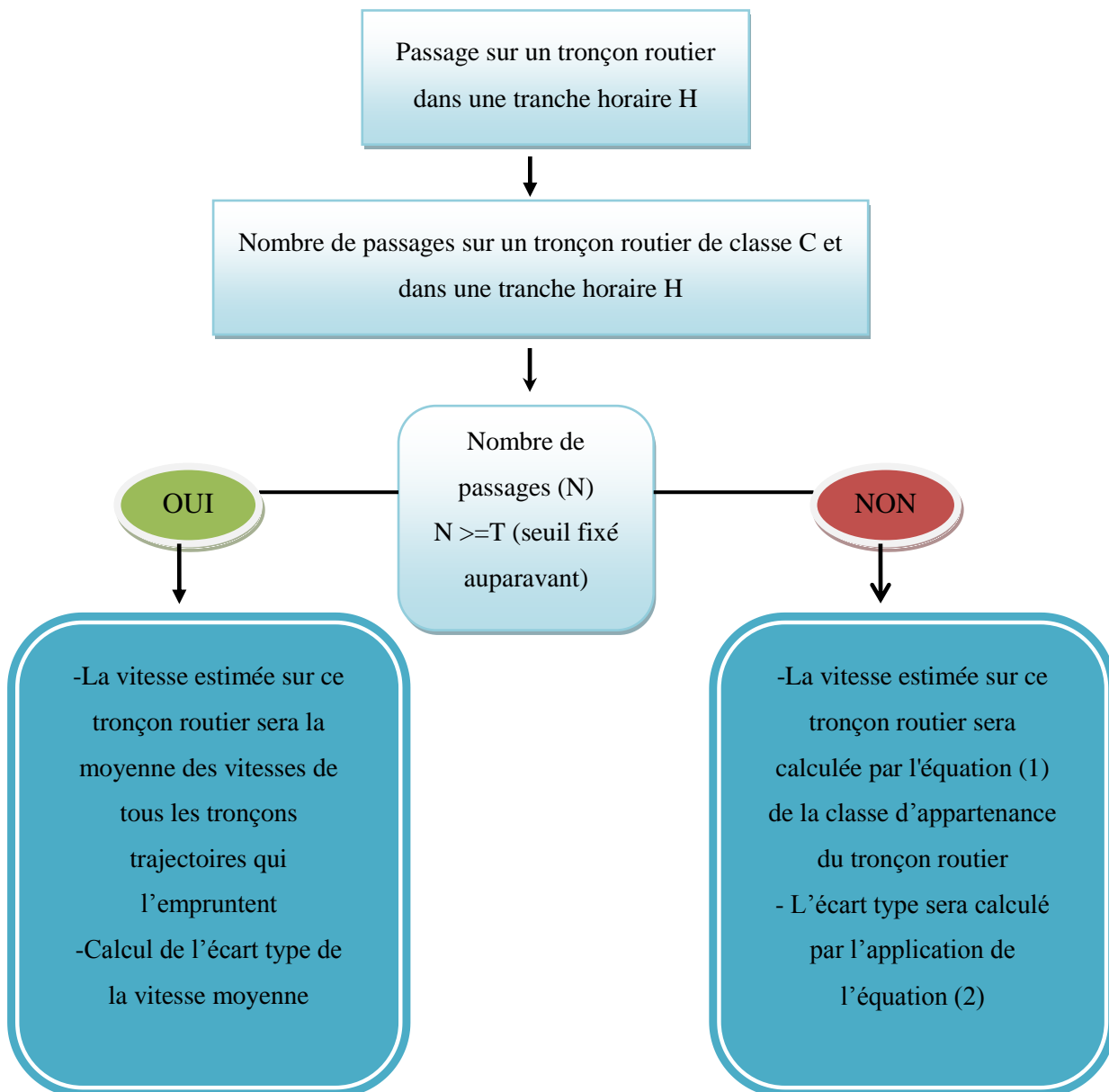


Figure 32 Méthode générale d'enrichissement de la base de données routière

3.5 Approche pour l'estimation de vitesses de parcours

3.5.1 Extraction et enrichissement par types abstraits

Dans cette section, nous présentons notre schéma conceptuel basé sur des TAD pour enrichir une base de données routière par des estimations de vitesses de parcours. Il diffère sensiblement de celui présenté dans (Sandu-Popa et al., 2009) : il s'agit de rattacher des mesures issues de trajectoires empruntées par le SMUR à des segments routiers sans connaître leurs positions relatives sur ceux-ci.

Afin d'extraire des informations avec une approche basée sur des TAD, nous pouvons utiliser les types **moving(point)**, **moving(int)** et les opérations **deftime**, **at**, **speed**, **atperiods**, **min**, **decompose**,

element, **count** définies dans (Güting et al., 2000 ; Güting et al., 2005), et l'opérateur **mean** défini dans (Sandu-Popa et al., 2009). Dans le tableau 2, nous décrivons les différentes opérations utilisées dans notre formalisme (les types des paramètres d'entrées cités dans le tableau suivant sont restreints à ceux que nous avons utilisés dans notre formalisme).

| Opérations | Paramètres en entrée | Paramètres en sortie |
|-------------------|--|--|
| Deftime | Un objet mobile par exemples moving (real), moving(integer) ou moving(point) | Un ensemble de périodes de temps durant lesquelles l'objet est défini |
| At | Un objet mobile par exemple moving(integer) et un attribut de type integer | La portion de l'objet mobile moving(integer) restreinte à la valeur passée en deuxième paramètre |
| Speed | Un objet mobile par exemple moving(point) | Un objet mobile de type moving(real) correspondant à la variation de la vitesse |
| Atperiods | Un objet mobile de type moving (point) et un ensemble d'intervalles de temps | Un objet mobile de type moving(point) restreint à l'ensemble des périodes de temps passées en deuxième paramètre |
| Min | Un ensemble de périodes de temps | Un instant qui correspond à la valeur de temps minimale des différentes périodes passées en paramètres |
| Decompose | Un ensemble de périodes de temps | Une table avec un tuple par période |
| Element | Une requête renvoyant une valeur unique de type entier | Une valeur de type entier |

Tableau 2 Présentations des opérations utilisées dans notre formalisme

Prenons par exemple les informations liées aux déplacements d'un véhicule d'urgence avec le schéma suivant :

```
urgence-trip (ur_id : int, trip : moving(point), circule:
moving(int))
```

La trajectoire spatio-temporelle est définie par la géométrie `trip` (déplacement libre). `Circule` est une fonction du temps qui représente la variation temporelle de l'identifiant du segment routier suivi au cours du déplacement. En vue de représenter la variation temporelle d'une entité spatiale **moving(point)** ou d'une valeur de type réel **moving(real)**, deux modèles peuvent être distingués : continu et discret (Erwig et al., 1998). Pour des raisons pratiques, on peut adopter le modèle discret (figure 33) qui représente l'évolution temporelle d'une entité par tranches (Güting et al., 2005).

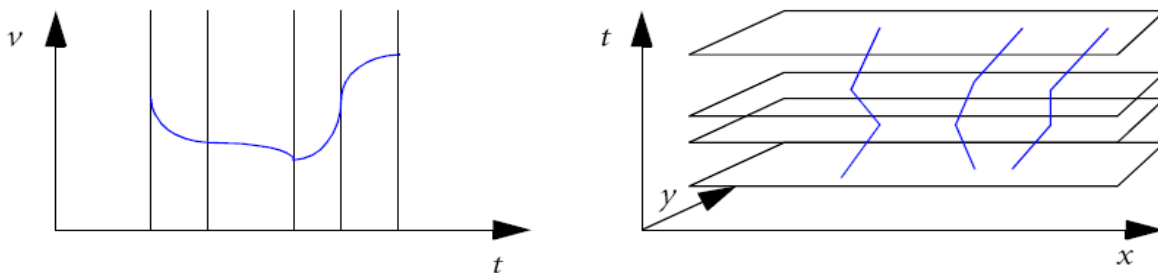


Figure 33 Représentation en tranches d'un réel mobile **moving(real)** et de trois points mobiles **moving(point)**(Güting et al., 2005)

Prenons l'exemple suivant : comment déterminer la vitesse moyenne observée sur un segment routier ayant comme identifiant n et dans une période de temps donnée $[d1, d2 [$, comme par exemple les vacances d'été d'une année ($d1$ et $d2$ deux instants de granularité journalière) ?

D'abord, il faut calculer le nombre des périodes durant lesquelles les tronçons de trajectoires ont emprunté le tronçon routier n . Ce calcul est réalisé pour les tronçons de trajectoires qui sont entrées sur ce segment dans la période de temps $[d1, d2 [$. Pour ce faire, on peut formuler les requêtes **Q1**, **Q2** et **Q3** suivantes.

Le but de l'application de ces requêtes est de pouvoir choisir la méthode d'estimation de vitesse de parcours: par méthode directe ou indirecte. Dans cet exemple, on précise que pour estimer la vitesse de parcours par le biais de la méthode directe, il faut que le nombre des trajectoires qui empruntent le segment routier n soit supérieur ou égal à un entier (N).

Par application des requêtes **Q1**, **Q2** et **Q3**, on récupère le nombre des périodes de temps durant lesquelles les tronçons de trajectoires ont emprunté le tronçon routier n .

Pour la formulation des requêtes **Q1**, **Q2** et **Q3**, nous définissons les variables suivantes :

- **periode_passage** est une table dans laquelle on récupère l'ensemble des périodes de temps durant lesquelles les tronçons de trajectoires ont emprunté le tronçon routier n ,
- **periode_decomposee** est une table dans laquelle on stocke les différents périodes distinctes issues de la table **periode_passage**,

- **nb_période** est une variable de type entier dans laquelle on stocke le nombre de périodes durant lesquelles les tronçons trajectoires ont emprunté le tronçon routier n.

Requête Q1

```
LET periode_passage =  
  
SELECT deftime(at(circule,n)) AS periods  
FROM urgence_trip  
WHERE min (deftime(circule))> =d1  
AND min(deftime(circule))<d2 ;
```

Requête Q2

```
LET periode_decomposee =  
  
periode_passage decompose[periods, period];
```

Requête Q3

```
LET nb_période = ELEMENT (  
  
SELECT count(period) FROM periode_decomposee) ;
```

Ensuite, on réalise une comparaison entre le nombre des périodes retourné par la requête Q3 et l'entier (N). Dans le cas où le nombre des périodes est supérieur ou égal à (N), on utilise la méthode directe pour estimer le temps de parcours. Pour cela, on applique la requête suivante Q4.

Requête Q4

```
Select mean (speed (atperiods(trip, Vacance))) from  
urgence-trip;
```

Dans le cas où le nombre des périodes retournées par la requête Q3 est inférieur à N, l'estimation du temps de parcours sur ce tronçon sera déterminée par le biais des règles de décisions (Dans le chapitre suivant, nous apportons plus de détail sur cet aspect). Afin d'enrichir la totalité de la base de données routière, les requêtes Q1, Q2 et Q3 peuvent être formulées pour toute période d'observations (avec différentes périodes de temps [d1, d2 [et différentes granularités.

Après l'enrichissement total de la base de données routière, le schéma de celle-ci peut être défini comme suit :

```
Reseau-enrichi (id: int, nom: string, vitesse-moy: p-  
moving(real))
```

On définit un nouveau type abstrait **p-moving(real)** qui représente la variation temporelle d'une valeur de type réel en fonction des périodes d'observations **po / po** \subset **PO**. Ces dernières se basent sur l'aspect périodique du temps (Faucher et al., 2010). Soit $\{po_i\}$ avec $i \in 1..N$ un ensemble fini de périodes d'observations. Chaque période **po** correspond à un « tuple » :

$\langle pa, pj, phr \rangle / pa \subset PA, pj \subset PJ$ et $phr \subset PHR$, avec PA les périodes annuelles (vacances / hors vacances scolaires), PJ les périodes journalières (du lundi jusqu'à dimanche), PHR les périodes horaires. A titre d'exemple, une période d'observation (poi) peut être la tranche horaire « 7h-9h » pour une journée de samedi en période de vacances scolaires. Le schéma « Reseau-enrichi » peut être complété par des attributs qui caractérisent un segment routier tels que le nombre de voies, la largeur de chaussée et le sens de la circulation.

3.5.2 Enrichissement par le biais d'un modèle conceptuel

Dans la section précédente, nous avons présenté notre formalisme pour l'estimation de vitesses de parcours basé sur des TAD. Pour pouvoir l'implémenter et faciliter sa réutilisation, nous proposons une traduction vers un formalisme conceptuel. Dans la section suivante, nous présentons trois exigences nécessaires pour assurer cette traduction.

3.5.2.1 Exigences pour la modélisation conceptuelle de la base de données des trajectoires

Dans (Zaki, 2010), l'auteur s'intéresse à la comparaison des différents modèles vis-à-vis des exigences de la modélisation des données spatio-temporelles dans un milieu urbain.

Dans la partie qui suit, nous allons procéder de la même façon. Nous allons effectuer une comparaison entre les différents modèles en se basant sur nos exigences. Afin de bien mener notre étude comparative entre les différents modèles conceptuels, nos exigences seront fixées comme suit :

- La facilité et la clarté pour la réutilisabilité du modèle

L'une de nos exigences est liée à la facilité, la clarté et la compréhension de notre modèle. Nous estimons qu'un modèle clair pourra faciliter la tâche de son implémentation dans les bases de données. De plus, un modèle compréhensible pourra être réutilisé par plusieurs acteurs tels que les concepteurs ou encore des simples utilisateurs non informaticiens.

- L'orthogonalité entre les concepts du modèle

L'orthogonalité est très importante puisqu'elle nous permet d'attribuer librement les dimensions spatiales, temporelles et spatio-temporelles aux différents concepts (classes et associations) du modèle.

- La possibilité d'attribuer des contraintes temporelles sur les associations

En plus des contraintes classiques (les contraintes de domaine, d'intégrité d'entité ou encore d'intégrité référentielle), le modèle conceptuel choisi doit pouvoir attribuer des contraintes spatiales et temporelles sur les associations. Nous présentons ci-dessous un exemple où nous montrons l'utilité et l'intérêt de l'utilisation d'une contrainte temporelle.

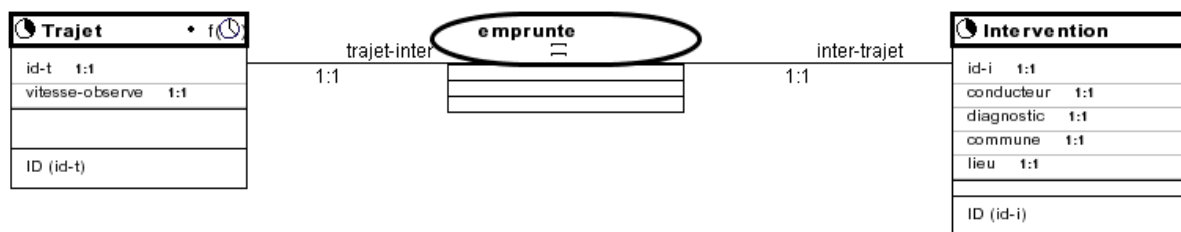


Figure 34 Exemple d'un schéma conceptuel

Dans notre schéma (figure 34), on définit deux classes : Trajet et Intervention. Chaque classe a un cycle de vie (un intervalle de temps durant lequel l'objet est actif). On suppose qu'une intervention du service d'urgence a généralement le même cycle de vie que son trajet, d'où la nécessité de prévoir une contrainte temporelle de type « égale ». Cette contrainte est modélisée dans notre schéma sur l'association « **emprunte** ».

3.5.2.2 Choix du modèle et SGBD approprié

3.5.2.2.1 Choix du modèle

Dans les sections 2.3.2.1 et 2.3.2.2, nous avons présenté deux familles de modèles conceptuels basés sur deux approches entité-association (MADS, STER) et orientés objet (STUML, Perceptory, Profil-UML, GeoFrame-T). A partir de cette description, nous remarquons que le modèle MADS est plus avantageux que les autres modèles, et ceci par rapport à nos exigences.

Au niveau clarté, MADS semble être le meilleur par rapport aux autres modèles. Il supporte l'orthogonalité entre les différents concepts du modèle (les dimensions spatiales, temporelles et spatio-temporelles peuvent être attribuées librement sur les différentes classes et les associations du modèle).

MADS permet aussi d'attribuer graphiquement les contraintes spatiales et temporelles sur les associations du modèle. En se basant sur nos exigences, nous estimons que le modèle MADS répond amplement à nos besoins. Dans la suite de notre étude, le modèle MADS sera utilisé dans la phase de la traduction de notre formalise en TAD vers un formalisme basé sur un modèle conceptuel.

3.5.2.2.2 Choix du SGBD approprié

Dans le but d'organiser la modélisation des données géographiques, ISO et l'Open Geospatial Consortium (OGC) proposent plusieurs normes et spécifications (Normes ISO 19107, ISO 19108 et OGC 01-101 ...etc). L'objectif essentiel de ces normes est d'assurer l'interopérabilité en vue de l'échange de données. On cite à titre d'exemples :

ISO 19107 est un schéma conceptuel qui définit les spécifications des concepts de spatialité.

ISO 19108 est un schéma temporel qui définit les spécifications des concepts de temporalité.

OGC 01-101 définit la spécification abstraite des concepts de spatialité.

On note que la cartouche temporelle TAU_TLL (TA universe Temporal Litteral Library) (Pelekis, 2002) et enrichie dans Hermes (Pelekis et al., 2006) n'est pas normalisée. Par contre, la cartouche spatiale PostGis respecte les spécifications de L'OGC (Herring, 2006).

Malgré la richesse des types temporels et / ou spatiaux fournis par Hermes et le besoin de les utiliser, nous nous orientons dans notre projet vers l'utilisation de la cartouche spatiale PostGis. En effet, ce choix est justifié, d'une part par le souhait de garantir l'interopérabilité pour l'échange de données, d'autre part par l'estimation que l'utilisation du logiciel libre pourrait faciliter la réutilisabilité de notre modèle.

3.5.2.2 Implémentation du schéma conceptuel

Dans cette section, nous présentons dans un premier temps les différents entités et attributs de notre schéma conceptuel basé sur le formalisme MADS. Dans un deuxième temps, nous décrivons les cardinalités entre les entités de notre modèle ainsi que les règles de transformations utilisées pour réaliser le passage du modèle conceptuel vers le modèle pré-relationnel.

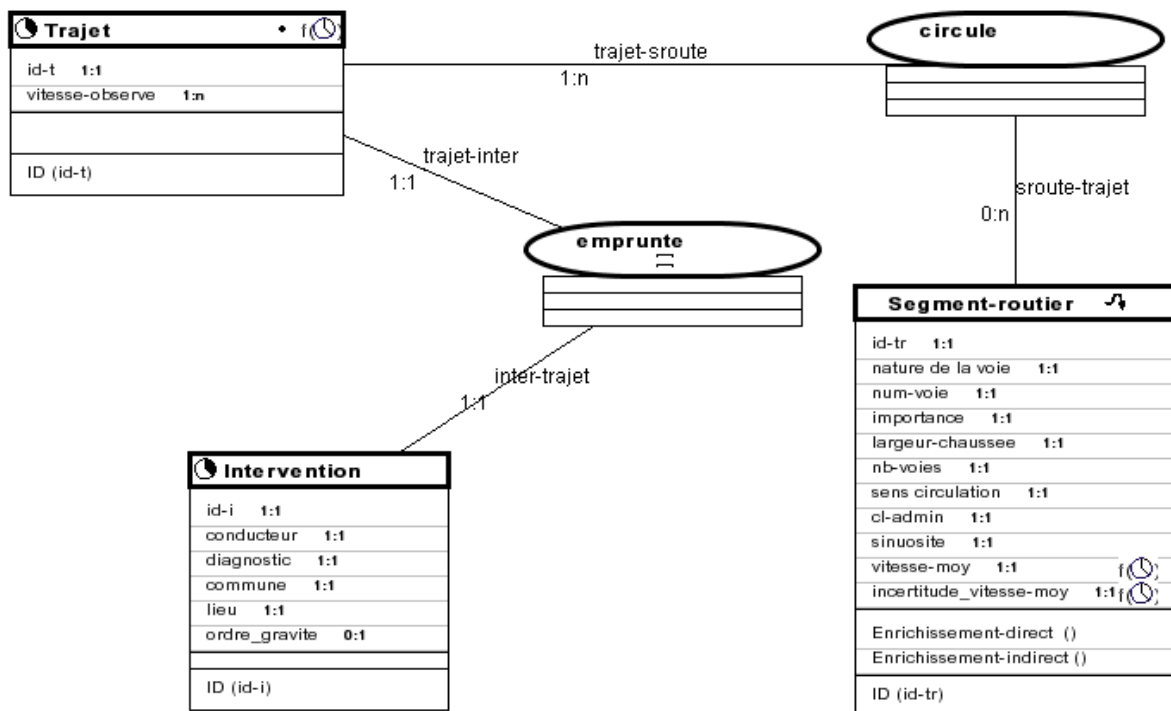


Figure 35 Schéma conceptuel de la base de données des trajectoires appariées

- Description des entités et attributs

Notre modèle présenté dans la figure 35 se compose de trois entités : Intervention, Trajet et Segment-routier.

-« Intervention » contient les attributs qui caractérisent une mission du SMUR.

-« Trajet » représente la trajectoire d’une intervention. Elle est caractérisée par des valeurs de vitesse qui varient en fonction du temps.

-« Segment-routiers » représente les différents segments routiers de la base de données routière du Référentiel à Grande Echelle (RGE) de l’IGN.

La méthode **Enrichissement_direct** () permet l’alimentation directe des attributs vitesse-moy et incertitude_vitesse-moy.

La méthode **Enrichissement_indirect** () utilise les résultats d’une application d’un algorithme de classification pour alimenter les attributs vitesse-moy et incertitude_vitesse-moy (Cette méthode sera détaillée dans le chapitre suivant).

Après l’enrichissement, un segment routier est caractérisé par une vitesse moyenne (vitesse-moy), une incertitude sur la vitesse moyenne (incertitude_vitesse-moy) ainsi que par un temps de trajet et son incertitude. Il s’agit d’attributs de type **p-moving(real)** qui représentent la variation temporelle de la vitesse moyenne et leurs incertitudes observées, par tranches horaires retenus dans notre projet. Les autres attributs de l’entité segment-routier sont issus de la base de données RGE.

- Description des rôles

Une intervention ne comporte qu'un seul trajet et un trajet appartient à une seule intervention. Par contre, un trajet peut emprunter un ou plusieurs segments routiers. Plusieurs trajets peuvent emprunter un même segment routier. Une contrainte temporelle de synchronisation « égale » est attribuée à l'association « emprunte » puisqu'une intervention possède le même cycle de vie que son trajet.

Les requêtes Q1, Q3 et Q4 définies dans (3.5.1) s'appliquent directement sur des tables relationnelles résultant de la transformation du formalisme MADS en SGBD relationnel (Minout, 2007).

Dans notre projet, pour le passage du modèle conceptuel vers le modèle relationnel, nous avons généralement appliqué les règles de transformations définies dans (Minout, 2007) avec quelques modifications que nous estimons utiles au niveau pratique. Afin d'avoir plus de facilité lors de l'appel du processus d'appariement, nous sauvegardons les trajectoires des interventions tronçons par tronçons (figure 36). Seul le cycle de vie des trajets est modélisé dans notre base. Un trajet a un instant de début et de fin de type « DateTime » (figure 37). Comme chaque intervention est liée à un trajet, nous avons également le cycle de vie (date de début et fin d'une intervention).

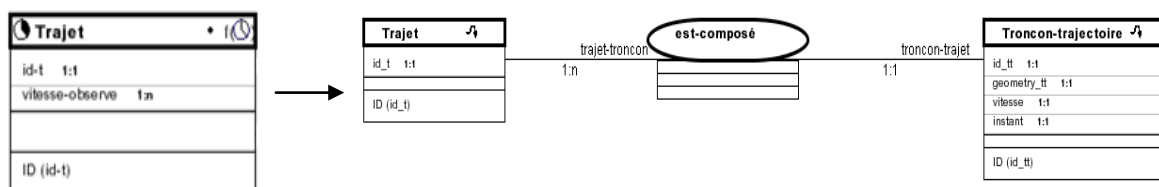


Figure 36 Transformation de l'entité « Trajet »

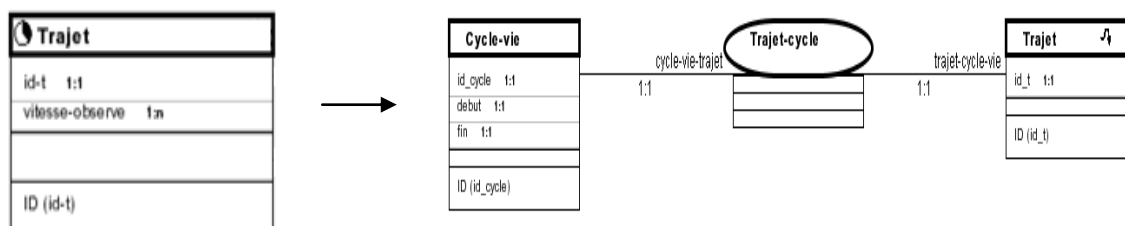


Figure 37 Transformation du cycle de vie de l'entité « Trajet »

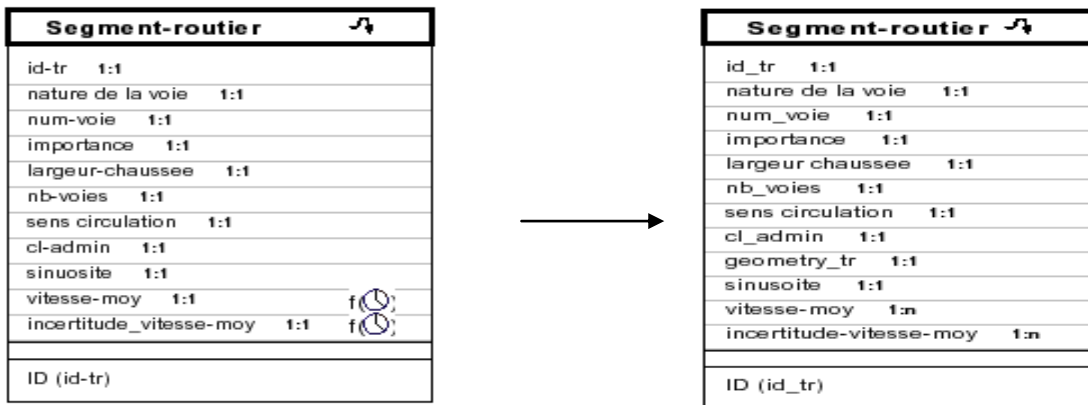


Figure 38 Transformation de l'entité « Segment-routier »

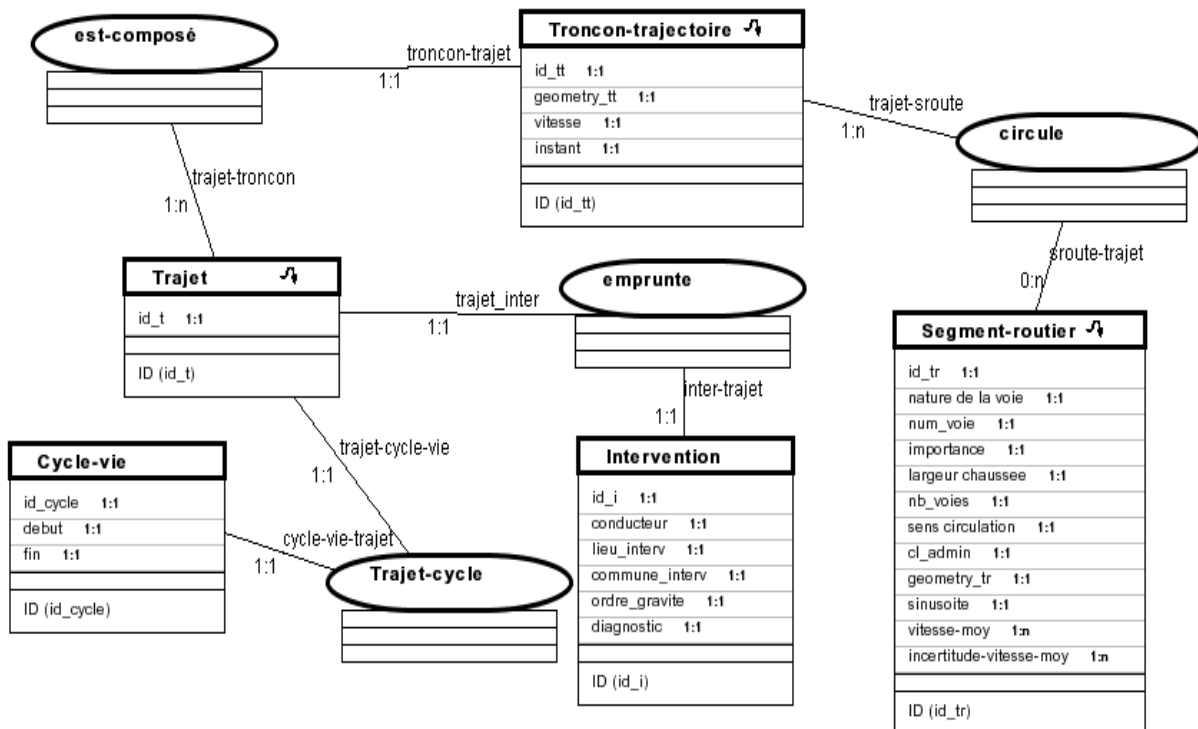


Figure 39 Schéma pré-relationnel du schéma conceptuel des trajectoires appariées des interventions

Après l'application de toutes les règles de transformation sur notre schéma conceptuel, notre modèle relationnel sera présenté de la façon suivante (figure 39) :

- **Trajet** (id-t, id-cycle#, id-i#, conducteur) (id-t : identificateur d'un trajet, id-cycle : identificateur d'un cycle de vie, id-i : identificateur d'une intervention).

- **Tronçon-trajectoire** :(id-tt, id-t, geometry-tt, vitesse, instant) (geometry-tt : la géométrie du tronçon trajectoire, vitesse : la vitesse observée sur le point du début du tronçon trajectoire, instant : datetime d'enregistrement du point du début du tronçon trajectoire)

- **Circule** (id-circule, id-t#, id-tt#, vitesse, instant, id-tr#, nature de la voie, nb-de voies, importance, largeur, sinusoite, categorie, geometry_tt).

En se basant sur notre modèle relationnel, plusieurs requêtes peuvent être résolues telles que :

1) La détermination du nombre de passages du véhicule d'urgence sur un tronçon routier donné dans une période de temps bien définie.

Pour faciliter l'interrogation des données de types temporels, on affecte une valeur numérique tenant compte de la tranche horaire (codification des périodes de temps définis auparavant).

```
Select count (distinct (id_t)) from circule where id_tr
= &troncon-routier and categorie= &categorie;
```

La première requête est utile pour fixer la méthode d'estimation du temps de parcours, soit directe ou indirecte.

2) La détermination de la moyenne et de l'écart-type des vitesses observées sur des routes dont la largeur des chaussées est inférieure ou égale à 4 mètres.

```
Select avg(vitesse), stdev(vitesse) from circule where
largeur <=4 ;
```

La deuxième requête sera utilisée pour dresser la courbe des vitesses moyennes en fonction de la largeur des chaussées. Cette courbe est très importante dans la phase de l'analyse statistique (Dans le chapitre numéro 4, nous détaillons d'avantage cet aspect).

3) La visualisation de la route suivie par une trajectoire donnée.

La troisième requête pourra être utilisée dans la phase de l'évaluation des estimations des temps de parcours par la méthode globale (Dans le chapitre numéro 4, nous précisons davantage l'intérêt de cette requête).


```
Select the_geom from route where id_tr IN (select
distinct(id_tr) from circule where id-t=&id-t) ;
```

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre méthode générale d'enrichissement d'une base de données routière par des mesures temporelles des vitesses de parcours et par leurs incertitudes. Ces mesures sont issues de l'historique des trajectoires des interventions du service d'urgence.

Nous avons présenté dans un premier temps notre formalisme qui se base sur des TAD. L'idée de base est de proposer un formalisme rigoureux pour des types et des fonctions adaptés à la manipulation de données spatio-temporelles. Dans un deuxième temps, ce formalisme est traduit vers un modèle conceptuel. Nous estimons que cette traduction est nécessaire pour faciliter la compréhension et l'implémentation de notre approche. De plus, ceci peut être utile pour sa réutilisabilité par plusieurs acteurs surtout les non-informaticiens.

L'avantage majeur de notre modèle réside dans la possibilité de garder la forme réelle des trajectoires et leurs relations avec le réseau routier. Ce type de modélisation est très utile pour se renseigner sur le type de conduite des ambulanciers et pour avoir la possibilité de corriger les erreurs d'appariement. Dans le chapitre suivant, nous détaillerons la méthode d'enrichissement indirecte.

Chapitre 4 Prédiction de vitesses de parcours et méthode de validation

Introduction

Notre approche d'estimation de vitesses de parcours se décline en deux méthodes : directe et indirecte. La méthode directe est utilisée dans le cas où l'on a assez de passages sur un tronçon routier. Dans le cas contraire, on utilisera la méthode indirecte. Ce chapitre se focalise sur notre stratégie d'enrichissement de la base de données routière par la méthode indirecte. Notre but consiste à trouver la classification la plus adaptée pour définir des comportements types de vitesses en fonction des tranches horaires et des caractéristiques physiques du réseau routier.

4.1 Méthode d'analyse et de classification des tronçons routiers : l'exemple canadien

Dans cette section, nous présentons une méthodologie qui sert à déterminer le lien possible entre les caractéristiques physiques des tronçons routiers et l'état de la circulation de la région Montréal. Nous nous intéressons à cette étude car nous estimons que la problématique de la prédiction du temps de parcours dépend essentiellement de l'historique de l'état de la circulation et des caractéristiques physiques des tronçons routiers.

Afin de mesurer la congestion routière, le ministère des transports du Québec a mené une collecte de données de temps de parcours entre 1998 et 2004. Une étude d'évaluation de la congestion routière a été réalisée par (Miro, 2006) en utilisant ces données. Elle a été effectuée sur des tronçons routiers fréquemment congestionnés.

Il est à noter que la collecte seule des vitesses pour l'estimation de temps de parcours est insuffisante pour une évaluation claire de la congestion routière (Loustau et al., 2009). En vue d'améliorer le travail présenté dans (Miro, 2006), (Loustau et al., 2009) proposent de regrouper les tronçons routiers (Groupe TP) selon les distributions des relevés de temps de parcours moyens (figure 40). Cette étude a été réalisée sur 811 tronçons routiers. Les auteurs ont choisi comme périodes pour leurs études les heures de pointe du matin.

Le regroupement des tronçons routiers a été réalisé sans tenir compte des caractéristiques physiques du réseau routier (nombre de voies, largeur des chaussées, etc).

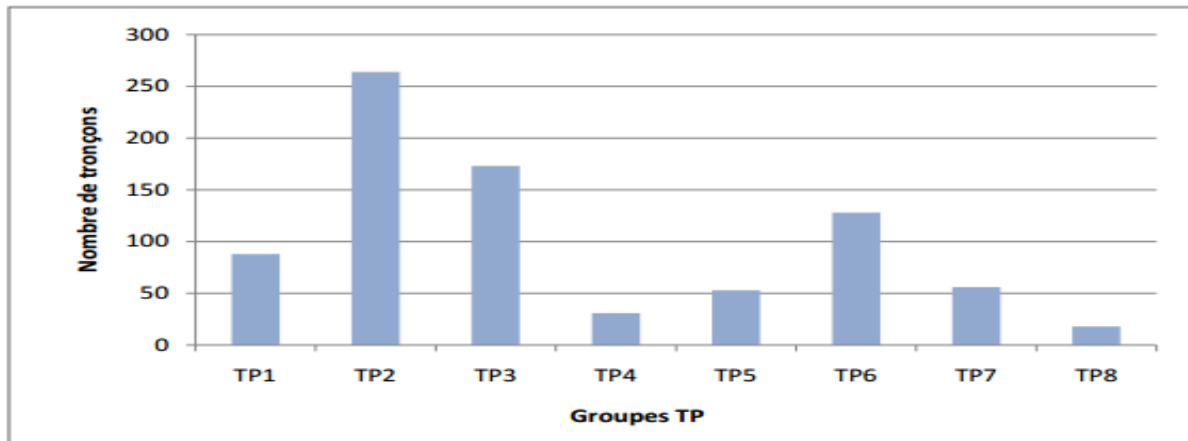


Figure 40 Répartition des segments routiers par groupe TP, heures de pointe du matin
(Loustau et al., 2009)

Dans l'optique de dresser le lien entre les caractéristiques physiques du réseau routier et l'état de la circulation de la région de Montréal (Canada), (Kalboussi, 2010) propose une démarche qui se compose de quatre étapes.

1) La première étape consiste à créer une base de données des tronçons routiers et de leurs caractéristiques physiques. Dans cette étape, l'auteur utilise le réseau routier de la région de Montréal. La base de données se compose de trois tables : la première comporte le groupement des tronçons routiers en se basant sur les distributions de temps de parcours moyens pour les 811 tronçons routiers. La deuxième table contient, et ceci pour chaque groupe défini dans la première table, deux indicateurs : la valeur de temps de parcours moyen et sa variabilité. Ces deux tables sont issues des travaux de (Loustau et al., 2009). Enfin, la dernière table contient les caractéristiques physiques des tronçons routiers qui ont été échantillonnés.

2) Dans la deuxième étape, l'auteur se focalise sur le regroupement des tronçons routiers selon leurs caractéristiques physiques (type de voies, sens de circulation, vitesse autorisée, nombre de voies, etc). La méthode statistique Analyse de Correspondance Multiple (ACM) a été utilisée pour la réalisation de cette tâche. Le choix de cette méthode est justifié par l'existence de plus de deux variables qualitatives (facteurs physiques des tronçons routiers) à étudier. Par le biais de cette méthode, une matrice de corrélation a été générée. Elle sert à dégager les différentes corrélations entre les facteurs physiques des tronçons routiers qui peuvent exister. Chaque groupe est composé des tronçons routiers dont les facteurs physiques ont une forte corrélation. Douze groupes « FP » ont été créés. A titre d'exemple, on cite les caractéristiques d'un groupe nommé par l'auteur par « FP1 » : des tronçons routiers de type autoroute à trois voies ayant une vitesse autorisée de 70km/h. Ce groupe est aussi caractérisé par l'accotement et le trottoir, et par la présence d'une barrière béton.

3) Concernant l'étape numéro trois, l'auteur fait le lien entre le nouveau regroupement réalisé par le biais de la méthode statistique (ACM) et celui bâti sur les distribution des temps de parcours (Lousteau et al., 2009). Cette étape est un moyen pour déterminer si les facteurs physiques qui caractérisent les tronçons routiers permettent d'expliquer l'état de la circulation.

4) Enfin, la dernière étape de la méthodologie consiste à générer un arbre et les règles de décisions qui servent d'une part à expliquer l'appartenance des tronçons routiers aux groupes TP à partir de leurs caractéristiques physiques, et d'autre part à prédire le temps de parcours sur le reste du réseau routiers. Dans la figure 41, nous résumons les différentes étapes de la méthodologie présentée par (Kalboussi, 2010) pour l'analyse et la classification des tronçons routiers selon leurs caractéristiques physiques.

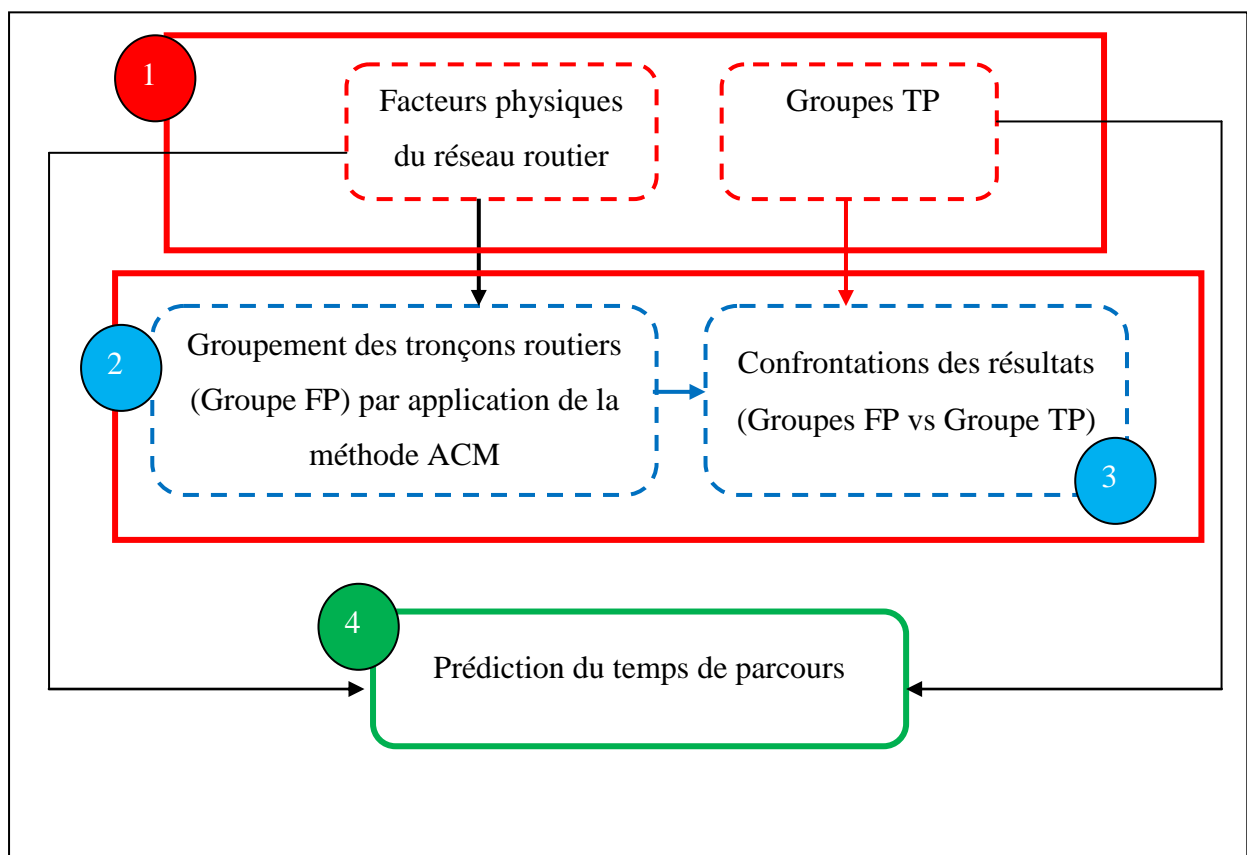


Figure 41 Méthodologie d'analyse et de classification des tronçons routiers d'après (Kalboussi., 2010)

Comme résultats de l'application de cette méthodologie, l'auteur précise que les facteurs physiques des tronçons routiers les plus pertinents et qui expliquent l'état de la circulation de la région Montréal sont :

Les types de voies, la vitesse autorisée, le sens de la circulation, le nombre de voies et le nombre d'entrées et de sorties.

4.2 Proposition d'une approche pour la prédiction de vitesses de parcours

Dans cette section, nous présentons notre méthodologie pour la prédiction de vitesses de parcours. Les résultats obtenus par l'application de cette méthodologie seront utilisés par la fonction d'enrichissement indirecte définie auparavant.

Afin de réaliser notre méthodologie, nous nous inspirons des idées présentées dans (Kalboussi., 2010). Notre méthodologie s'articule autour de quatre étapes :

- La première étape se focalise sur l'analyse de la variation de la vitesse et ceci selon chaque facteur retenu dans notre étude (les tranches horaires et les caractéristiques physiques du réseau routier). Le but de cette étape est de pouvoir étudier l'impact de chaque facteur sur la variation de la vitesse (étude de la distribution des vitesses). Les facteurs qui n'influencent pas sur la variation de la vitesse seront exclus de notre étude.

- La deuxième étape se décline en deux sous-étapes. La première consiste à étudier la corrélation entre les différents facteurs retenus dans la première étape et les observations des vitesses. Seul le facteur fortement corrélé sera retenu. Dans la deuxième sous-étape, nous continuons à étudier la corrélation entre le facteur retenu dans la première sous-étape et le reste des facteurs. Seuls les facteurs qui sont faiblement corrélés seront retenus pour la suite de notre méthodologie (troisième étape). Notre idée consiste à minimiser la redondance entre les différents facteurs. Pour réaliser cette tâche, nous utilisons la méthode statistique (ACM).

- Dans la troisième étape, nous appliquons une méthode de "Data Mining" (algorithme de classification) afin de générer un arbre et des règles de décisions pour classer les tranches de vitesse selon les facteurs retenus. Ils nous servent d'outils de prédiction du temps de parcours sur les différents tronçons routiers. Nous n'utilisons que les facteurs retenus dans l'étape numéro 2. Dans notre approche, on propose de classer des tranches ou des intervalles de vitesse au lieu des valeurs déterministes. L'idée est de prendre en considération l'incertitude sur les vitesses observées.

- Enfin, la dernière étape de notre méthodologie consiste à évaluer notre méthode d'estimation du temps de parcours. Pour ce faire, nous proposons les trois sous-étapes suivantes :

- La première sous-étape consiste à déterminer pour chaque règle de décision son indice de dispersion (désigne le rapport entre la vitesse moyenne et son écart-type) et le pourcentage de la bonne classification des tranches de vitesses.
- Dans la deuxième sous-étape, nous régénérons les histogrammes des effectifs des vitesses selon les règles de décisions définies dans l'étape numéro trois. Le but de cette étape est de déterminer un intervalle d'incertitude pour la vitesse à partir de l'étude des distributions des vitesses représentées par ces histogrammes. Pour cela, on génère la répartition empirique des vitesses à

partir de laquelle on détermine l'intervalle de vitesse dont la probabilité est fixée à 68%. Cet intervalle d'incertitude correspond exactement à l'intervalle :

[vitesse moyenne – écart type, vitesse moyenne + écart type] dans le cas d'une distribution gaussienne.

- Enfin, nous réalisons dans la dernière étape une comparaison entre les itinéraires proposés par notre calculateur d'itinéraires et l'historique des trajectoires.

Dans la figure 42, nous résumons les différentes étapes de notre méthodologie précédemment définies et permettant de prédire de vitesses de parcours.

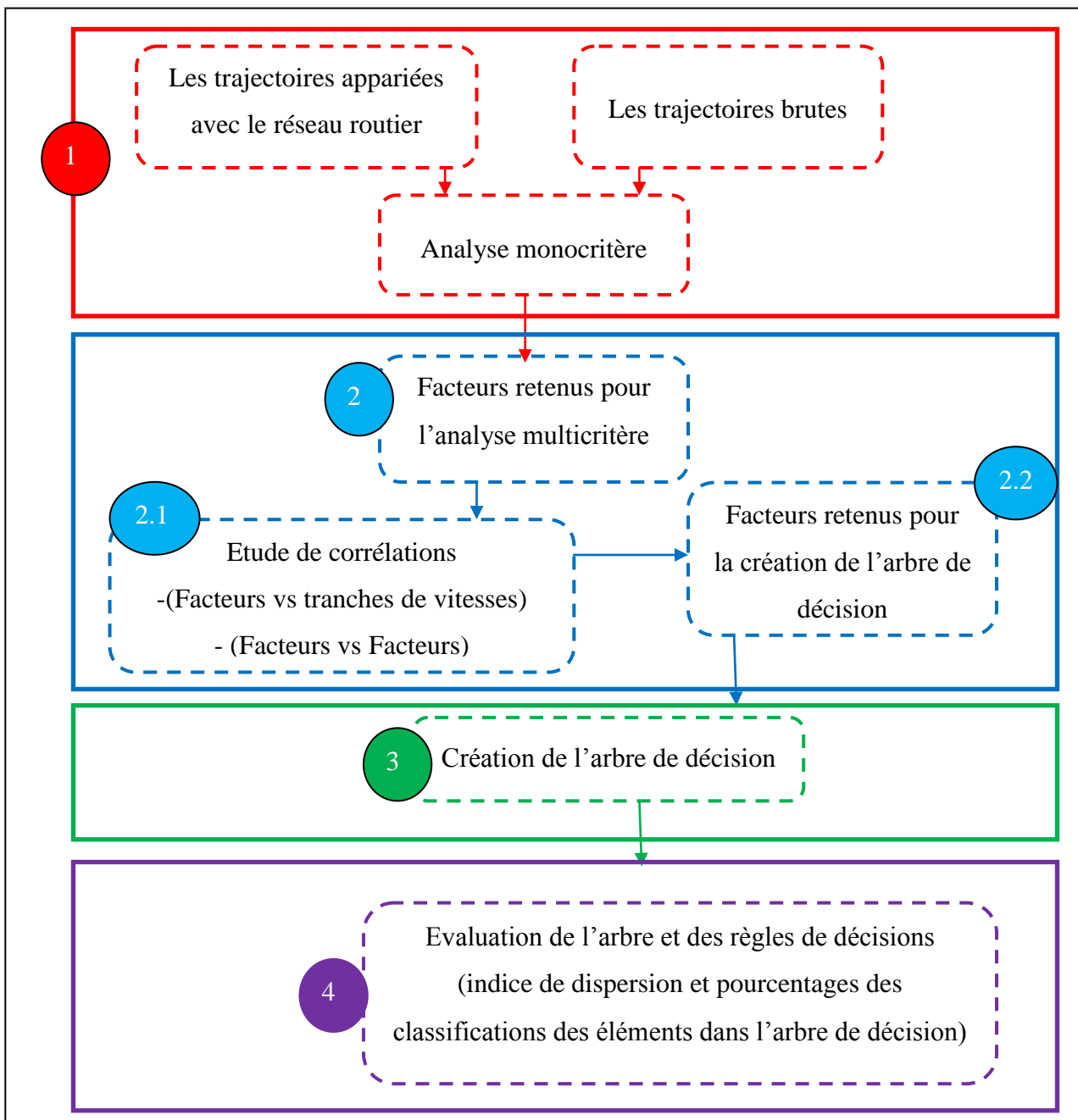


Figure 42 Méthodologie pour la prédiction de vitesses de parcours

4.2.1 Analyses monocritères

Dans cette section, nous présentons la première étape de notre méthodologie pour la prédiction du temps de parcours. On va générer et analyser les différents histogrammes qui représentent l'effectif des vitesses et ceci pour chaque facteur retenu pour notre étude. Le but de cette étape est d'étudier l'impact de chaque facteur sur la variation du temps de parcours. Les critères adoptés dans notre analyse sont les tranches horaires et les caractéristiques physiques du réseau routier (nombre de voies, largeur des chaussées, l'existence de feux tricolores, ...etc). Ils sont définis de la façon suivante :

- a) Période d'observation : 4 tranches horaires (7h-9h), (11h30-14h), (16h30-19h) et une tranche horaire pour le reste de la journée (les tranches horaires sont fixées pour toute période de vacances et/ou hors vacances du lundi jusqu'au dimanche),
- a) Importance de la route : on définit 5 classes de 1 jusqu'à 5,
- b) les largeurs des chaussées : Quatre classes réparties dans les intervalles suivants :
[2 ; 5],] 5 ; 7],] 7 ; 10,5],] 10,5 ; 17],
- d) Nombre de voies : on définit 4 classes de 1 jusqu'à 4,
- e) Nature des tronçons routiers : on définit 6 classes : bretelle, route à 1 chaussée, route à 2 chaussées, route empierrée, quasi-autoroute et autoroute.

Dans le tableau numéro 1 (page 40), nous avons présenté les différentes périodes et les moments de la journée pouvant influencer sur l'état de la circulation. Pour des raisons d'insuffisance de données (nombre de trajectoires), seules les quatre tranches horaires définies dans (a) ont été prises en compte dans la suite de notre étude. Quant aux classes des largeurs des chaussées, elles sont déterminées à partir d'une observation sur la courbe de la vitesse moyenne en fonction des largeurs des chaussées. Les classes d'importance des routes sont directement issues de la base de données routières de l'IGN :

- ✓ Importance 1 : « assure les liaisons entre métropoles et compose l'essentiel du réseau européen ».
- ✓ Importance 2 : « correspond aux liaisons entre départements ».
- ✓ Importance 3 : « désigne les liaisons entre 2 villes à l'intérieur d'un département ».
- ✓ Importance 4 : « correspond à la route qui permet de se déplacer rapidement à l'intérieur d'une commune et dans les zones rurales ».
- ✓ Importance 5 : « est la route qui permet de desservir à l'intérieur d'une commune ».

De plus, nous avons étudié l'impact des signalisations (les feux tricolores) sur la variation des vitesses issues des trajectoires empruntées par le service d'urgence lors de son intervention. L'objectif de cette étude est double. Si on constate que les feux tricolores ont un impact sur la variation de la vitesse, il faut alors nécessairement tenir compte de leur présence dans notre analyse. De plus, un temps d'arrêt pourra être modélisé au niveau de ces signalisations. Ce type de modélisation influe directement sur le

choix du type de graphe pour la modélisation du réseau routier qui est nécessaire pour le calcul d'itinéraire (ce point sera détaillé davantage dans le chapitre numéro 5).

Dans les sections suivantes, nous présenterons les effectifs des tranches de vitesses observées selon chaque facteur retenu. L'objectif de cette étude est de pouvoir retenir seulement les facteurs qui ont un impact sur la variation des vitesses.

4.2.1.1 Analyse selon les tranches horaires

Dans cette classification, on va générer les différents histogrammes qui représentent l'effectif des différentes valeurs de la vitesse en se basant seulement sur un critère temporel. Pour cela, on va étudier la variation de la vitesse pour les quatre tranches horaires (7h-9h), (11h30-14h), (16h30-19h) et une tranche pour le reste de la journée.

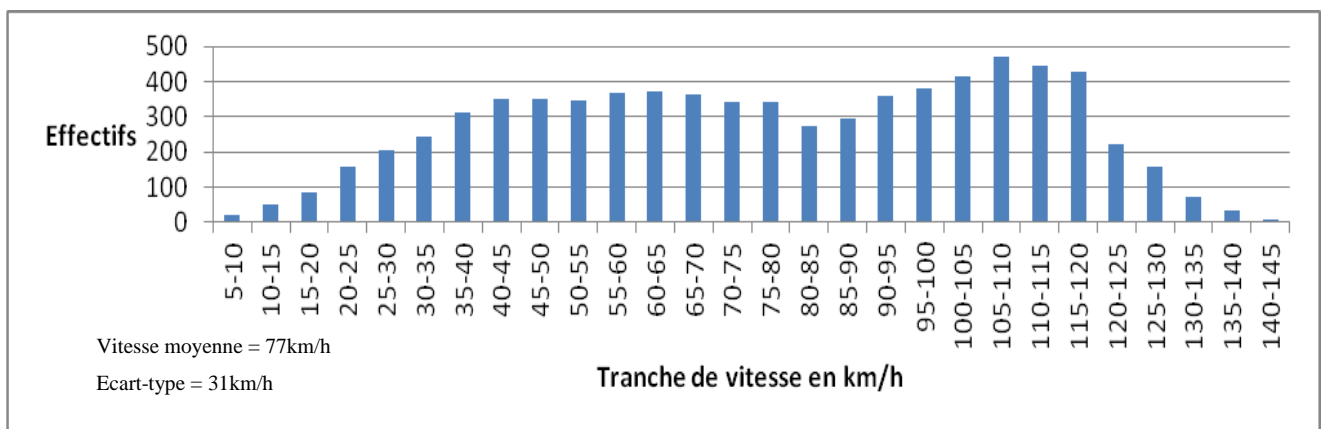


Figure 43 Effectifs des vitesses observées dans la tranche 7h-9h

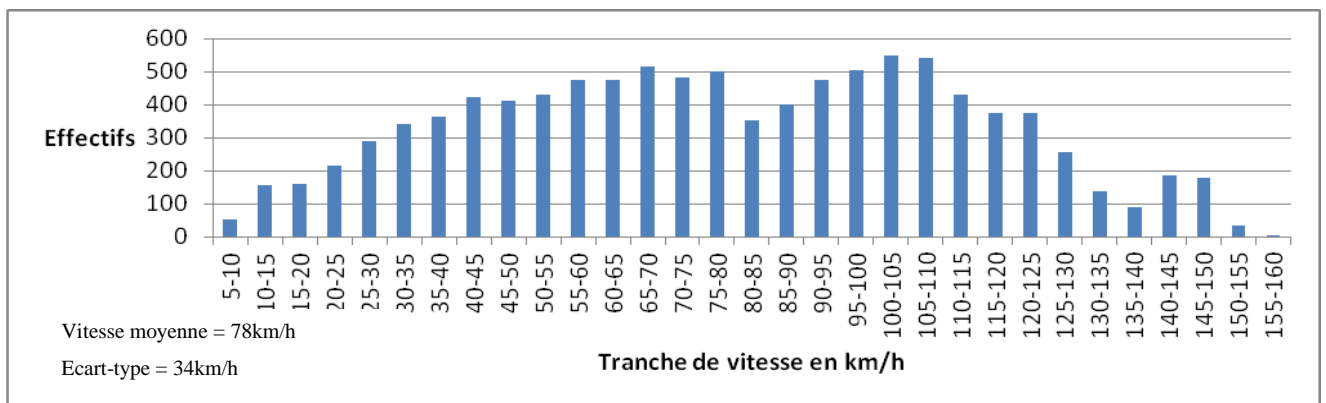


Figure 44 Effectifs des vitesses observées dans la tranche 11h30-14h

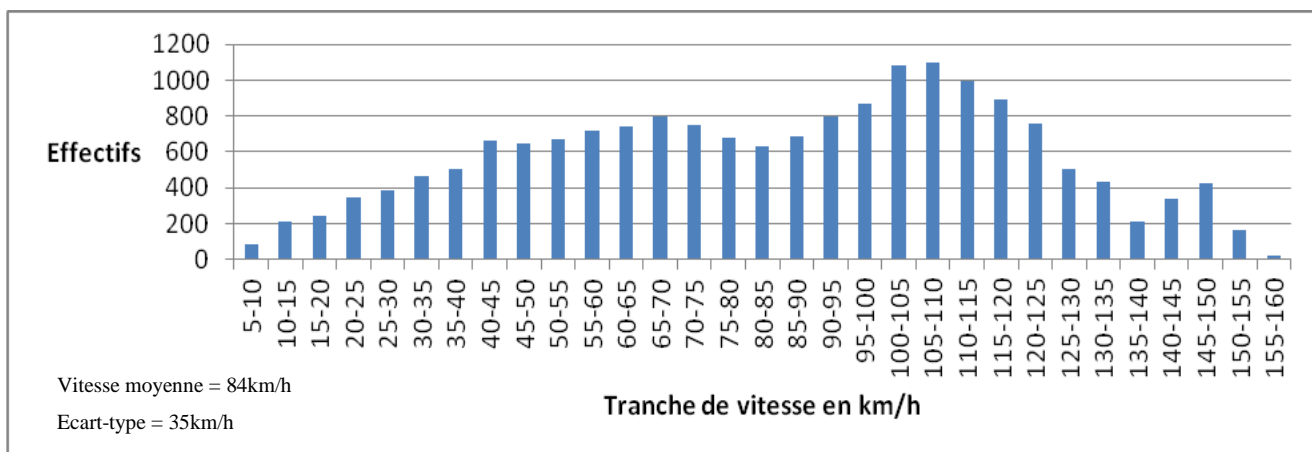


Figure 45 Effectifs des vitesses observées dans la tranche 16h30-19h

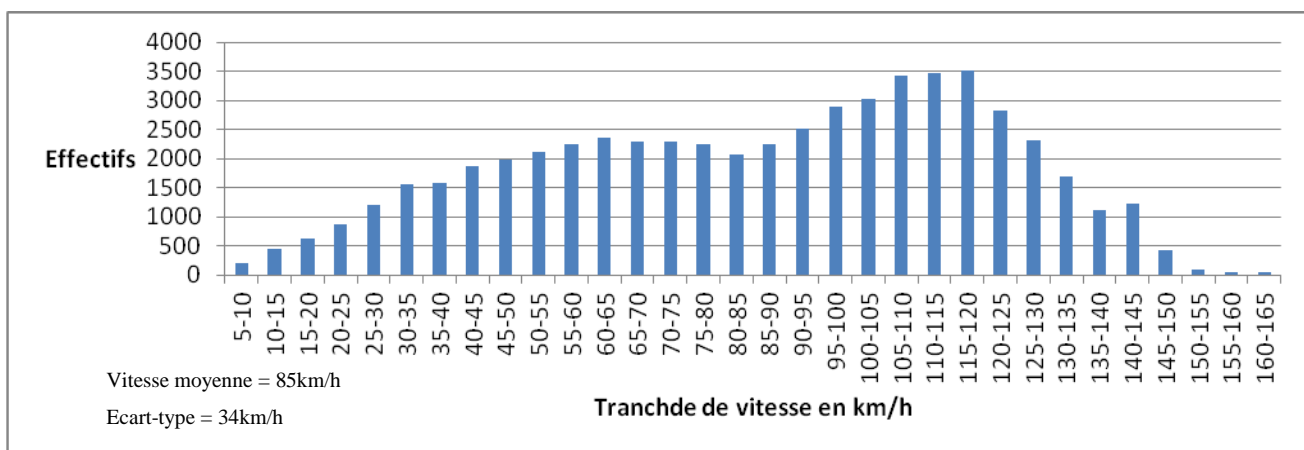


Figure 46 Effectifs des vitesses observées dans la tranche du reste de la journée

Les premières constatations qu'on peut tirer des histogrammes présentés dans les figures 43, 44 et 45 sont les suivantes : une distribution très étendue avec deux modes et un pic plus important pour les vitesses allant de 100 à 115 km/h pour les tranches horaires « 7h - 9h », « 11h30 - 14h » et « 16h30 - 19h ». Concernant la tranche horaire « reste de la journée » le pic de la vitesse est observé sur la tranche 115 – 120 km/h.

Pour mieux visualiser nos résultats issus de ce type de classification, nous avons dressé les tableaux suivants :

| Tranche horaire | Nombre de tronçons des trajectoires | Nombre des trajectoires | Pourcentage (%) |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| 7h-9h | 6404 | 30 | 9 |
| 11h30-14h | 8776 | 41 | 13 |
| 16h30-19h | 15132 | 55 | 17 |
| Reste de la journée | 47823 | 183 | 59 |

Tableau 3 Récapitulatif des observations en fonction des tranches horaires

A partir du tableau 3, on remarque que presque 60% de nos observations (nombre de tronçons trajectoires et nombre de trajectoires) sont enregistrées dans la tranche horaire « reste de la journée ».

| Tranches horaires | Vitesse moyenne (km/h) | Ecart-type km/h | Vitesse médiane (km/h) |
|---------------------|------------------------|-----------------|------------------------|
| 7h-9h | 77 | 31 | 77 |
| 11h30-14h | 78 | 34 | 78 |
| 16h30-19h | 84 | 35 | 87 |
| Reste de la journée | 85 | 34 | 90 |

Tableau 4 Récapitulatifs des vitesses moyennes, des écarts types et des vitesses médianes observées en fonction des tranches horaires

A partir du tableau 4, on constate que les vitesses moyennes observées sur les tronçons routiers varient légèrement en fonction des tranches horaires. Cela pourrait être dû à l'influence d'autres facteurs comme les facteurs physiques du réseau routier qui n'ont pas été pris en considération. Cette constatation peut être justifiée puisqu'on constate une distribution avec deux modes à partir des différents histogrammes présentés auparavant.

4.2.1.2 Analyse selon la largeur des chaussées

Dans cette classification, seul le facteur lié à la largeur des chaussées est pris en considération dans la génération des histogrammes.

Avant de commencer ce type de classification, il faut déterminer les différentes classes et leurs seuils. Pour ce faire, on va dresser la tendance de la courbe de la vitesse moyenne observée en fonction de la largeur des chaussées.

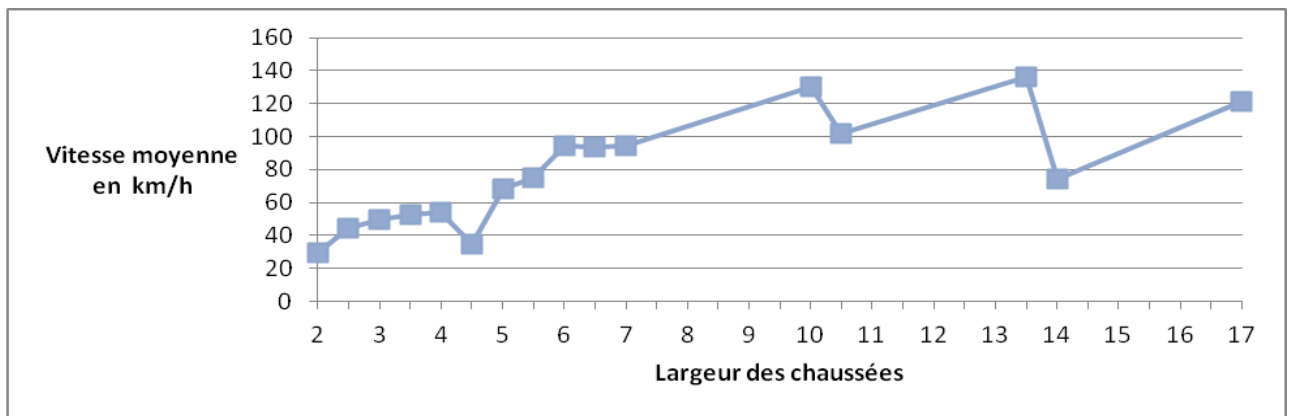


Figure 47 Vitesse moyenne en fonction de la largeur des chaussées

En observant la tendance de la courbe de la vitesse moyenne en fonction de la largeur des chaussées (figure 47), on remarque bien que la variation de la largeur des chaussées influe directement sur la variation de la vitesse. À partir de cette courbe, nous avons déterminé quatre classes de largeurs des chaussées qui sont réparties dans les intervalles suivants :

- ✓ Classe 1 : [2 ; 5] mètres.
- ✓ Classe 2 :] 5 ; 7] mètres.
- ✓ Classe 3 :] 7 ; 10,5] mètres.
- ✓ Classe 4 :] 10,5 ; 17] mètres.

Après avoir fixé les différentes classes liées aux largeurs des chaussées, nous procédons par la génération des différents histogrammes des effectifs des vitesses observées et ceci pour chaque classe définie auparavant.

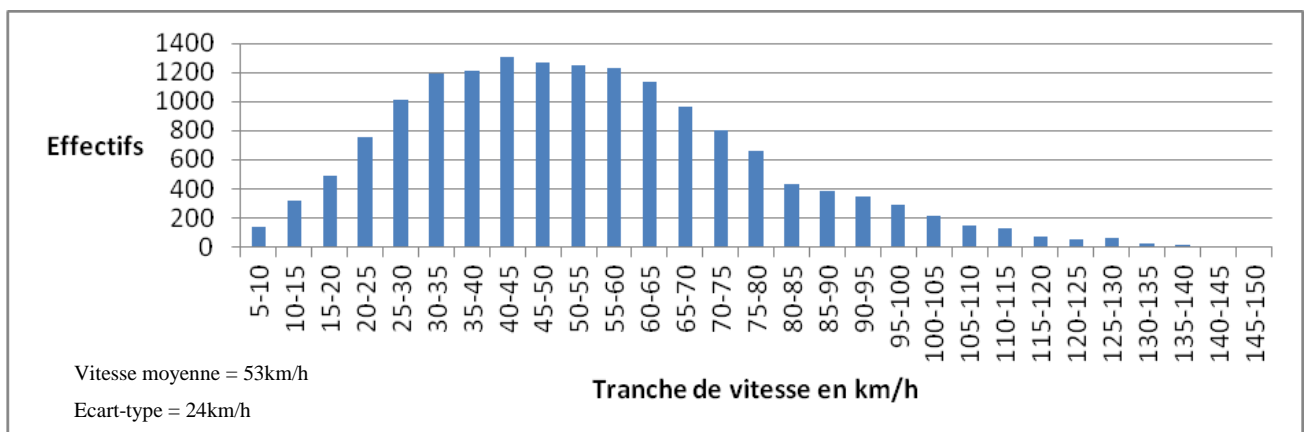


Figure 48 Effectifs des vitesses observées sur les routes dont la largeur des chaussées appartient à la classe 1

On remarque dans la figure 48 une distribution serrée entre les tranches 20-25 km/h et 75-80 km/h et avec un seul mode. On constate aussi que la distribution suit une loi gaussienne. Des observations peu significatives sont éparpillées sur le reste de l'histogramme.

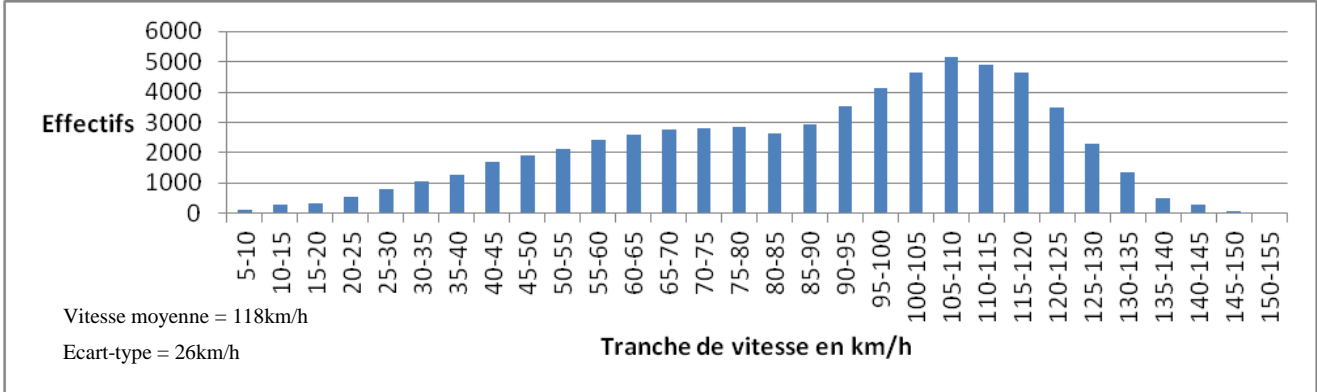


Figure 49 Effectifs des vitesses observées sur les routes dont la largeur des chaussées appartient à la classe 2

En observant la figure 49, on constate une distribution très étendue et avec deux modes. Des observations significatives sont localisées entre les tranches 65-80 km/h et 100-120km/h.

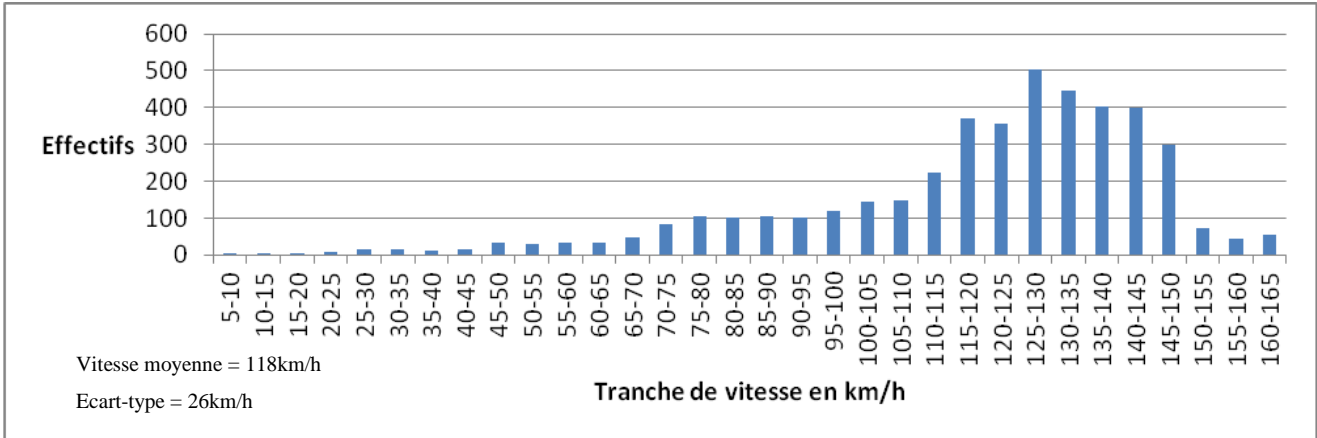


Figure 50 Effectifs des vitesses observées sur les routes dont la largeur des chaussées appartient à la classe 3

Dans la figure 50, les observations significatives commencent à partir de la tranche 110-115km/h jusqu'à la tranche 145-150 km/h. Un pic est observé sur la tranche 125-130 km/h. La distribution suit une loi gaussienne.

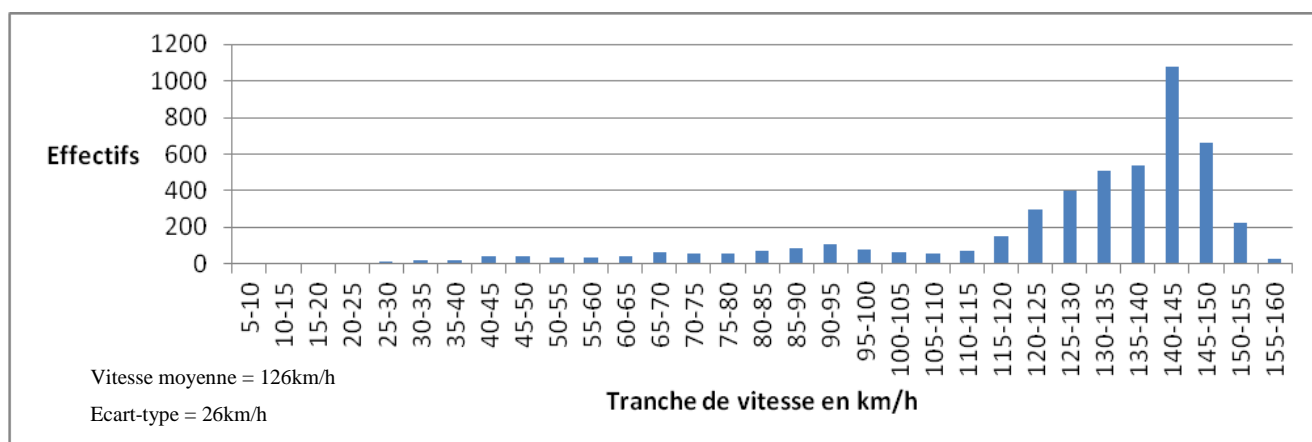


Figure 51 Effectifs des vitesses observées sur les routes dont la largeur des chaussées appartient à la classe 4

Dans l’histogramme présenté dans la figure 51, on constate une distribution très serrée entre la tranche 120-125 km/h et la tranche 150-155km/h et avec un seul mode. Un pic est observé sur la tranche 140-145km/h.

Les histogrammes générés dans les classes 1, 3 et 4 sont bien serrés et avec un seul mode, ce qui montre bien le bon choix de ces classes. Pour éviter l’étendue de la distribution de l’histogramme générée dans la 2^{ème} classe, nous avons testé les largeurs des chaussées appartenant aux intervalles [5,5 ; 6 [et [6 ; 7] mètres. Cependant, on a trouvé une distribution très étendue dans les histogrammes générés dans ces deux dernières, d’où la nécessité de croiser plusieurs facteurs pour avoir des histogrammes bien serrés.

Afin d’avoir une idée sur le pourcentage de répartition des tronçons trajectoires dans les classes liées à la largeur des chaussées, nous dressons le tableau suivant :

| Classes des largeurs des chaussées (en mètres) | Nombre de tronçons des trajectoires | Pourcentage (%) |
|--|-------------------------------------|-----------------|
| [2 ; 5] | 14495 | 18 |
|] 5 ; 7] | 36641 | 46 |
|] 7 ; 10,5] | 3919 | 5 |
|] 10,5 ; 17] | 4297 | 5 |

Tableau 5 Récapitulatif des observations en fonction de la largeur des chaussées

A partir du tableau 5, on constate que la majorité de nos observations (tronçons trajectoires) sont enregistrées sur des routes dont la largeur des chaussées est comprise entre 5,5 et 7 mètres.

L'objectif de cette classification est de pouvoir confirmer que la variation des largeurs des chaussées a une influence directe sur la variation de la vitesse moyenne.

| Classes des largeurs des chaussées (en mètres) | Vitesse moyenne (km/h) | Ecart-type km/h | Vitesse médiane (km/h) |
|--|------------------------|-----------------|------------------------|
| [2 ; 5] | 53 | 24 | 51 |
|] 5 ; 7] | 118 | 26 | 125 |
|] 7 ; 10,5] | 118 | 26 | 125 |
|] 10,5 ; 17] | 126 | 26 | 135 |

Tableau 6 Récapitulatifs des vitesses moyennes, des écarts types et des vitesses médianes observés en fonction de la largeur des chaussées

Les résultats présentés dans le tableau 6 sont conformes à nos attentes. On remarque bien que la vitesse moyenne augmente avec la largeur des chaussées, d'où la confirmation de l'influence de la variation des largeurs des chaussées sur les valeurs des vitesses moyennes. De plus, une seule classe de largeurs [5,5 ; 10,5] mètres pourra être utilisée par regroupement des deux classes de largeurs [5,5 ; 7] et] 7 ; 10,5] mètres.

4.2.1.3 Analyse selon le nombre de voies

Dans cette analyse, on va étudier l'impact du nombre de voies sur la variation de la vitesse observée.

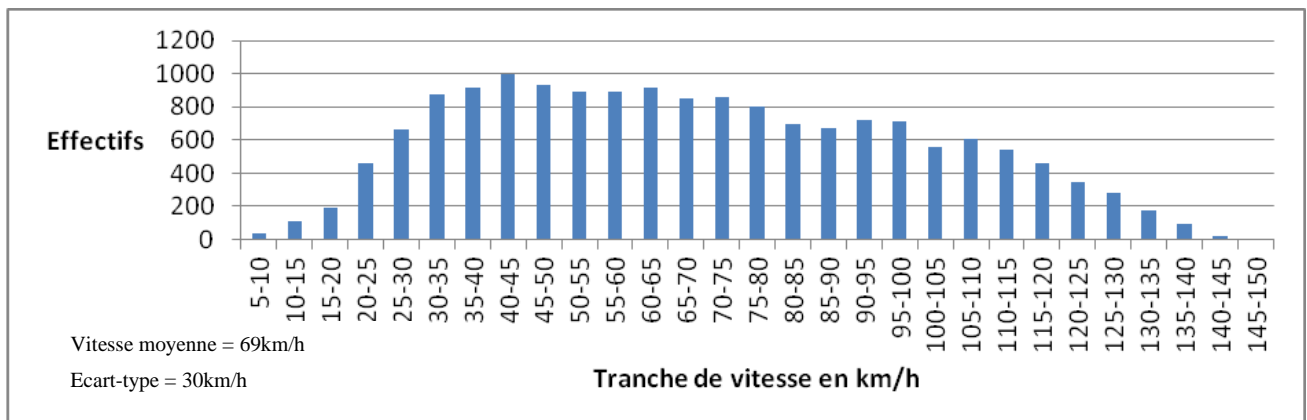


Figure 52 Effectifs des vitesses observées sur les routes à 1 voie

A partir de la figure 52, on constate une distribution très étendue : un mode qui se distingue assez nettement sur la tranche de vitesse 35-50km/h, des effectifs qui restent importants entre la tranche de vitesse 50km/h et 80km/h, puis un deuxième pic moins évident autour de la tranche de vitesse 95 km/h.

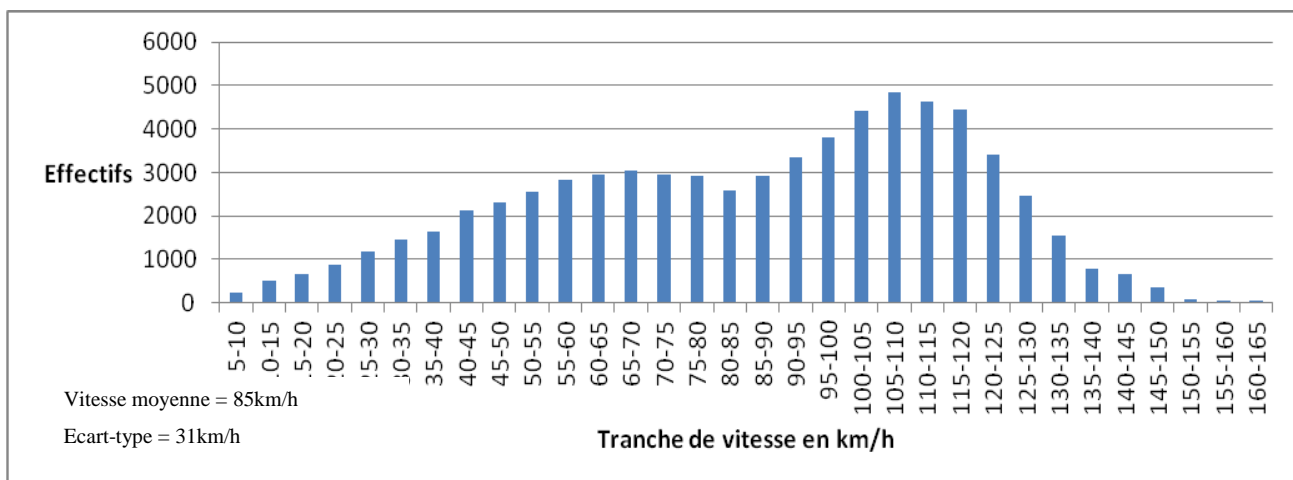


Figure 53 Effectifs des vitesses observées sur les routes à 2 voies

Dans la figure 53, la distribution est très étendue et avec deux modes autour des tranches de vitesse (65-70 km/h) et (105-110 km/h). De nombreux effectifs sont observés dans les tranches 100-105 km/h, 105-110km/h, 110-115km/h et 115-120km/h.

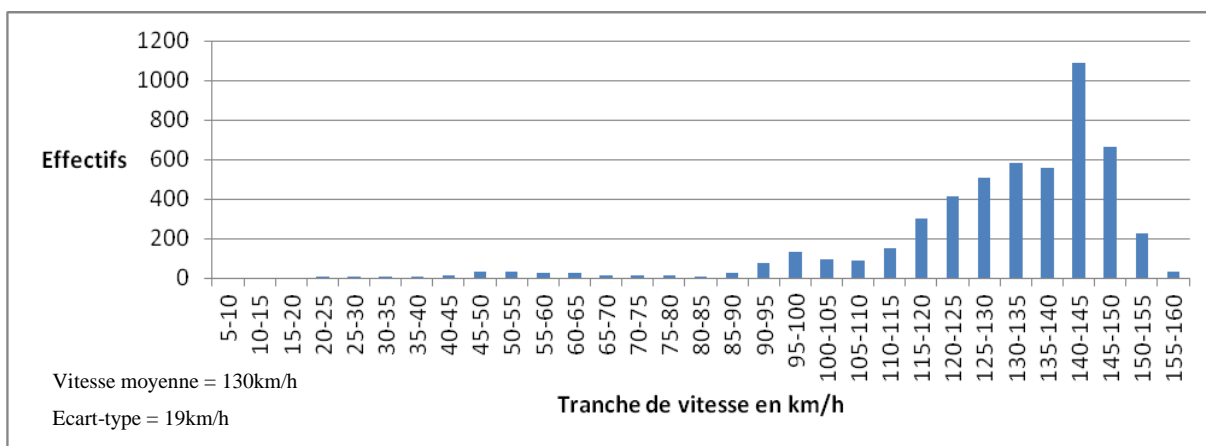


Figure 54 Effectifs des vitesses observées sur les routes à 3 voies

Concernant la figure 54, on observe une distribution bien serrée entre les tranches 130-135 km/h et 145-150km/h. Un pic est observé sur la tranche 140-145km/h.

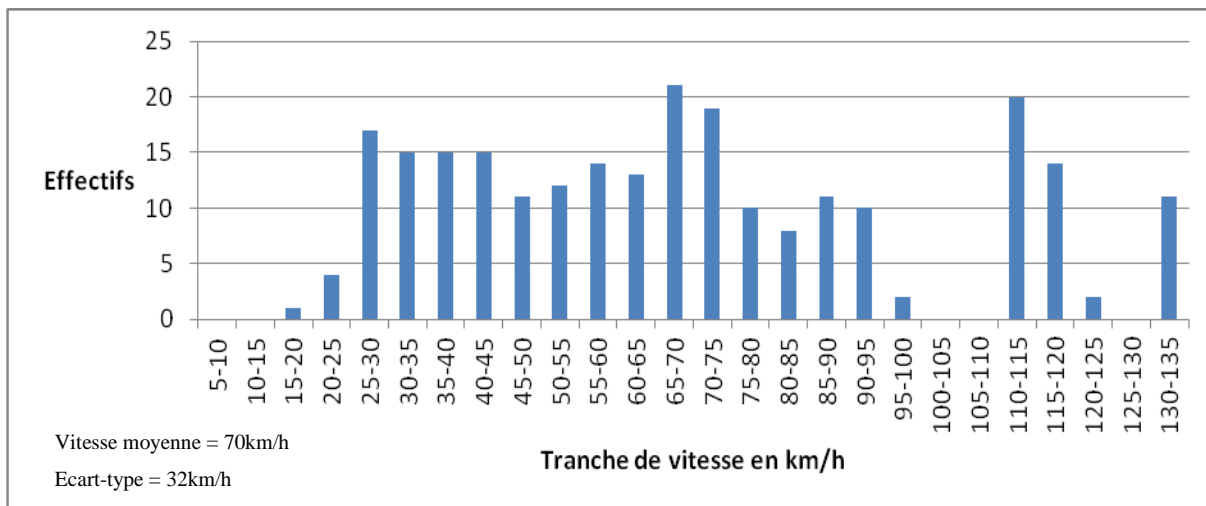


Figure 55 Effectifs des vitesses observées sur les routes à 4 voies

Dans la figure 55, la distribution est très étendue, trois pics sont observés sur les tranches 25-30km/h, 65-70km/h et 110-115km/h. Peu d'observations sont enregistrées dans cette classe. Nous avons par conséquent un échantillon peu représentatif de point de vue statistique.

On constate que les distributions des vitesses générées dans ce type de classification sont généralement très étendues à l'exception de la classe 3.

4.2.1.4 Analyse selon l'importance de la route

Pour cette classification, on va étudier l'impact de l'importance de la route sur la variation de la vitesse.

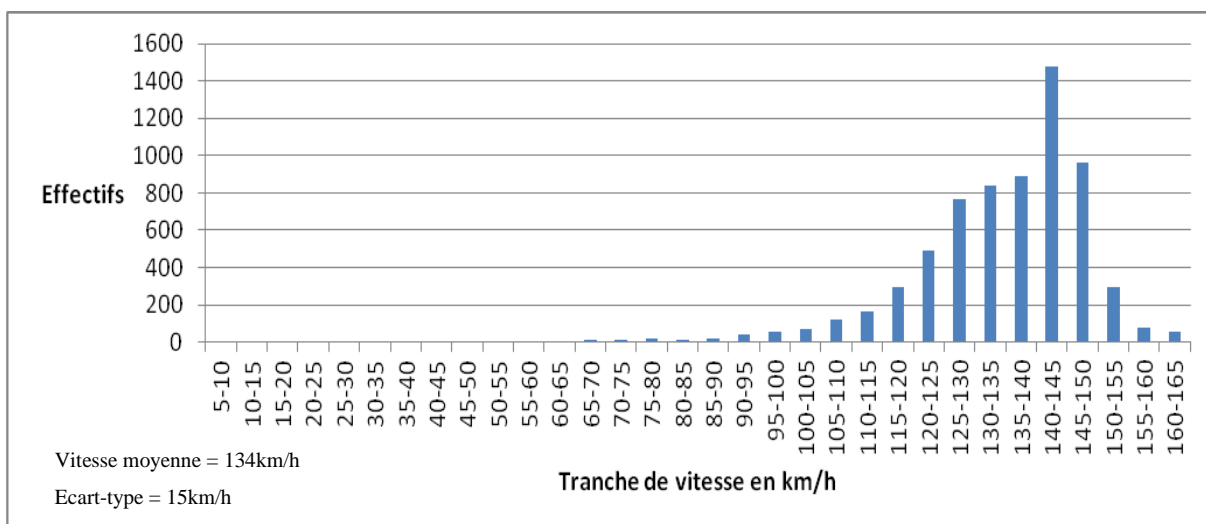


Figure 56 Effectifs des vitesses observées sur des routes dont l'importance est égale à 1

Dans la figure 56, on constate une distribution bien serrée autour des tranches 125-130km/h et 145-150km/h et avec un seul mode. Un pic est observé sur la tranche 140-145km/h.

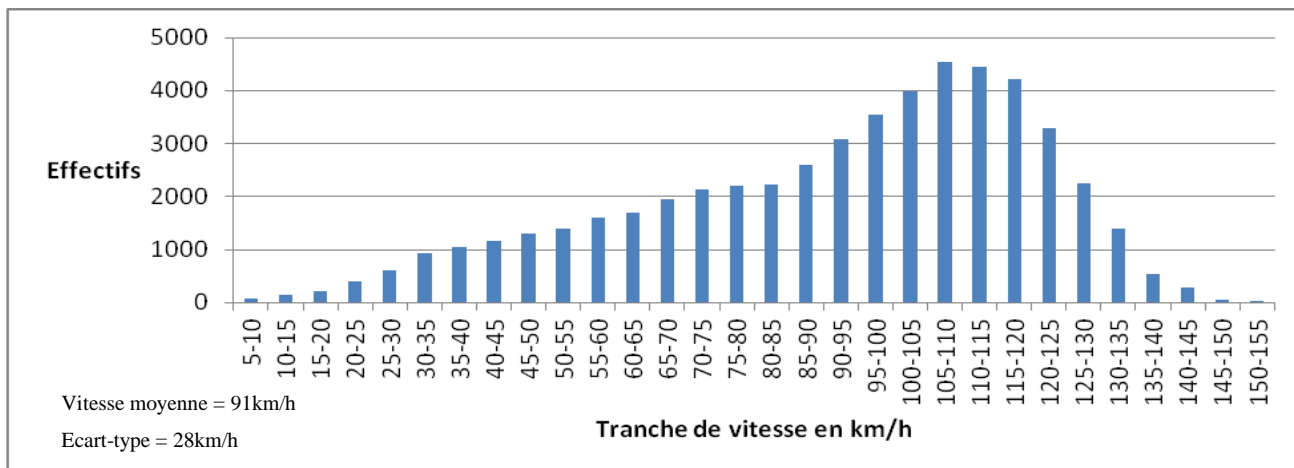


Figure 57 Effectifs des vitesses observées sur les routes dont l'importance est égale à 2

A partir de la figure 57, on observe une distribution très étendue et avec un seul mode mais avec une queue de distribution étalée vers la gauche. On constate aussi d'importants effectifs dans les tranches des vitesses 100-105km/h à 115-120km/h.

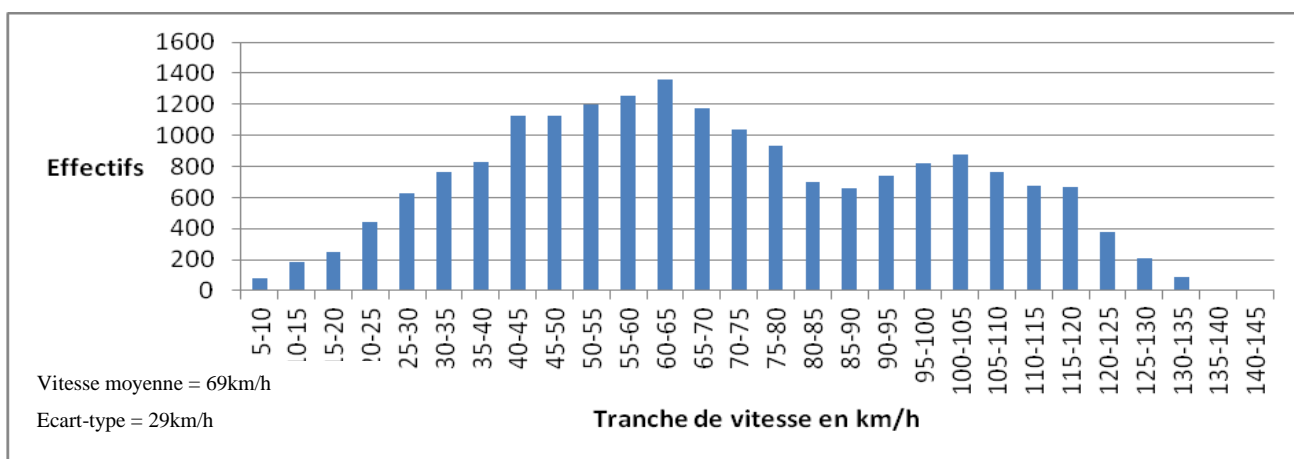


Figure 58 Effectifs des vitesses observées sur les routes dont l'importance est égale à 3

La distribution observée dans la figure 58 est très étendue avec deux modes autour des tranches des vitesses (60-65km/h) et (100-105km/h). De plus, on peut remarquer que pour le premier mode on a un comportement de vitesse proche de celui des routes d'importance égale à 4.

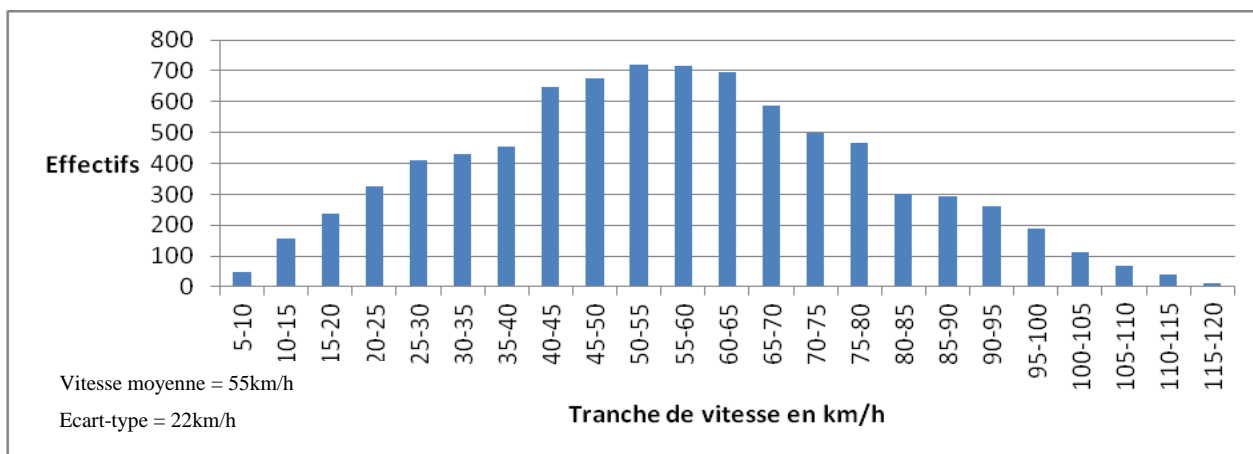


Figure 59 Effectifs des vitesses observées sur les routes dont l'importance est égale à 4

Dans la figure 59, on remarque que la distribution est très étendue et qu'elle suit une loi gaussienne. Le pic de la vitesse est observé entre 50 et 65 km/h.

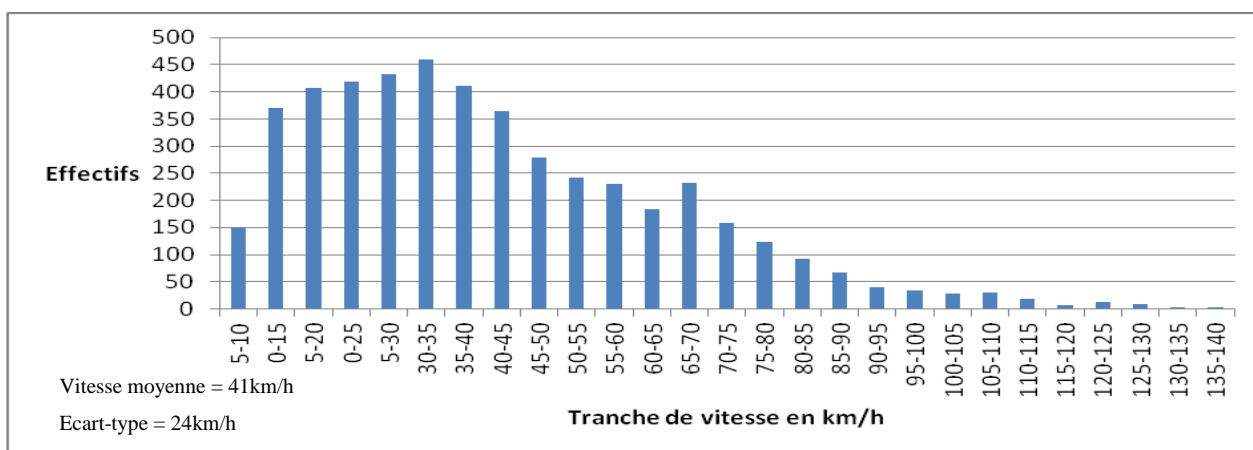


Figure 60 Effectifs des vitesses observées sur les routes dont l'importance est égale à 5

Dans la figure 60, on observe une queue de distribution étendue vers la droite. Les fortes observations sont détectées autour des tranches (10-15km/h) et (40-45km/h). Ce résultat est prévu car une route d'importance égale à 5 dessert l'intérieur d'une commune.

4.2.1.5 Analyse selon la nature du tronçon routier

Dans cette section, nous générons les différents histogrammes des effectifs des vitesses selon la nature des tronçons routiers.

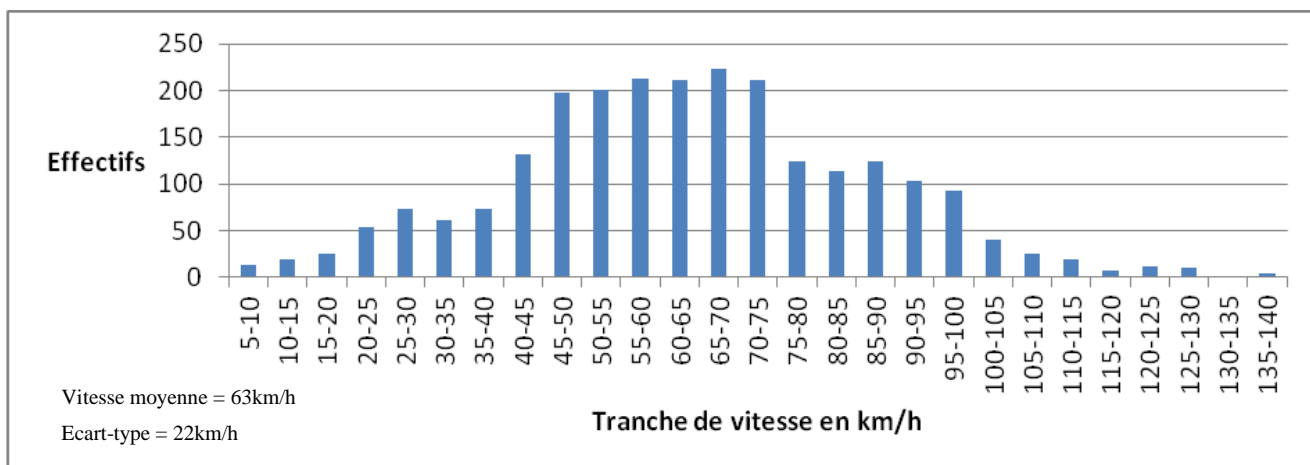


Figure 61 Effectifs des vitesses observées sur les routes de type bretelle

À partir de la figure 61, on constate une distribution qui suit la loi gaussienne. L'effectif des vitesses est pratiquement constant de la tranche 45-50km/h jusqu'à 70-75km/h.

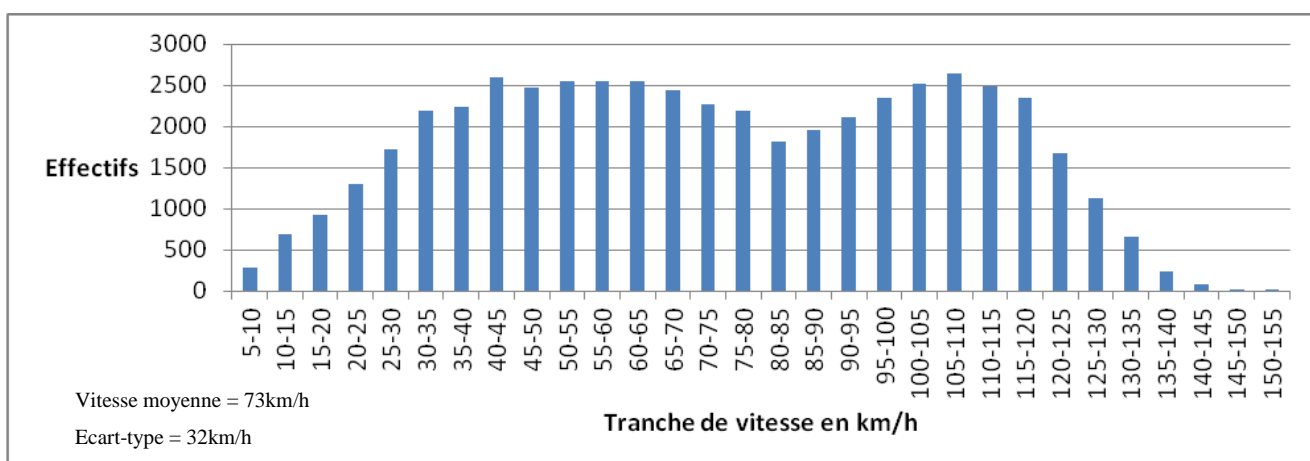


Figure 62 Effectifs des vitesses observées sur les routes de type « Route à 1 chaussée »

Concernant la figure 62, on constate une distribution très étendue avec deux modes autour des tranches de vitesses 40-45km/h et 105-110km/h.

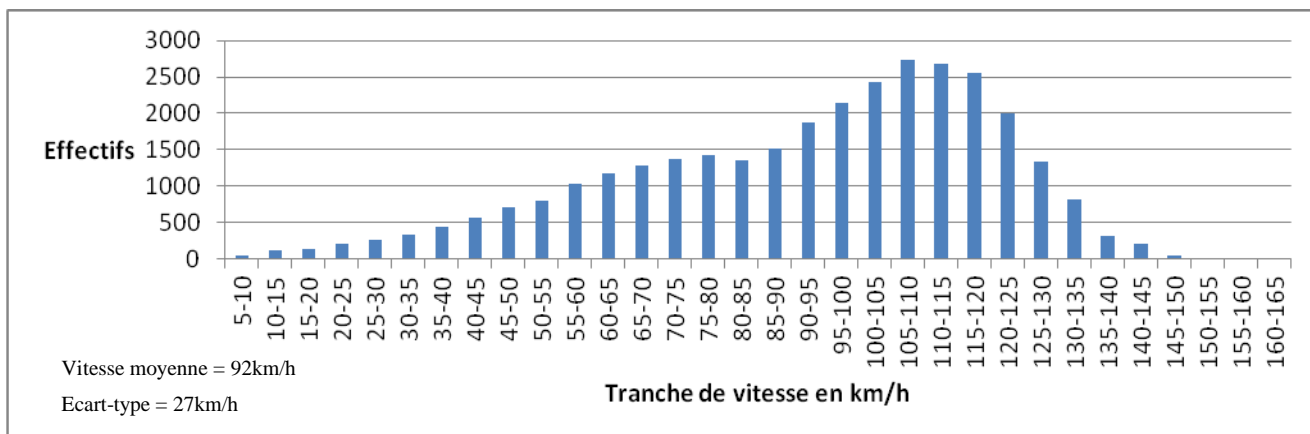


Figure 63 Effectifs des vitesses observées sur les routes de type « Route à 2 chaussées »

À partir de la figure 63, on observe une distribution étendue et avec deux modes autour des tranches des vitesses 75-80 km/h et 105-110km/h. On constate aussi beaucoup d'observations entre les tranches 90-95km/h et 120-125km/h.

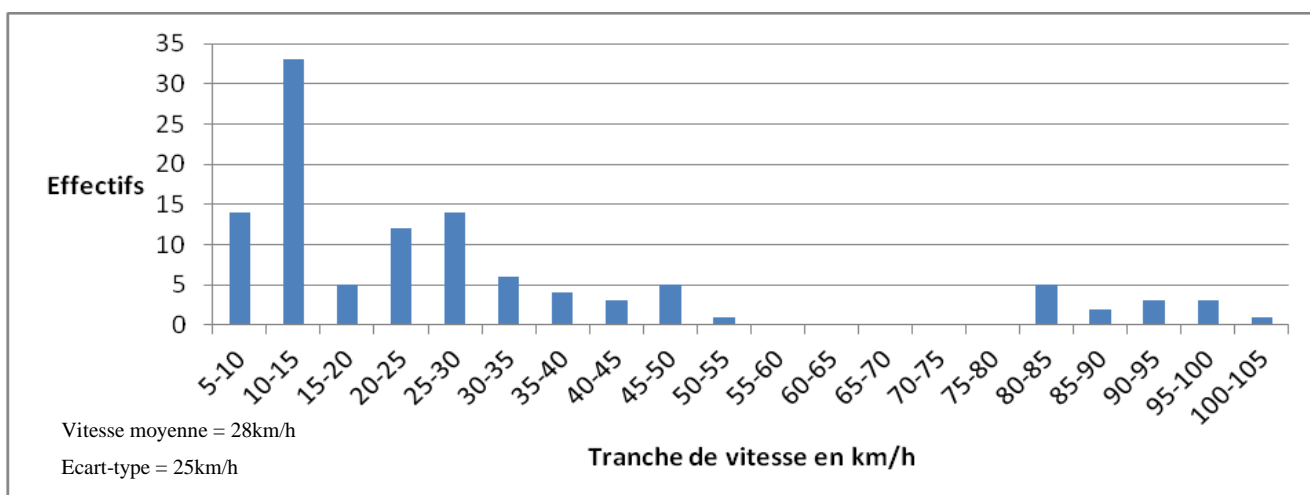


Figure 64 Effectifs des vitesses observées sur les routes de type Route empierrée

À partir de la figure 64, on ne peut rien conclure puisqu'on dispose de peu d'observations.

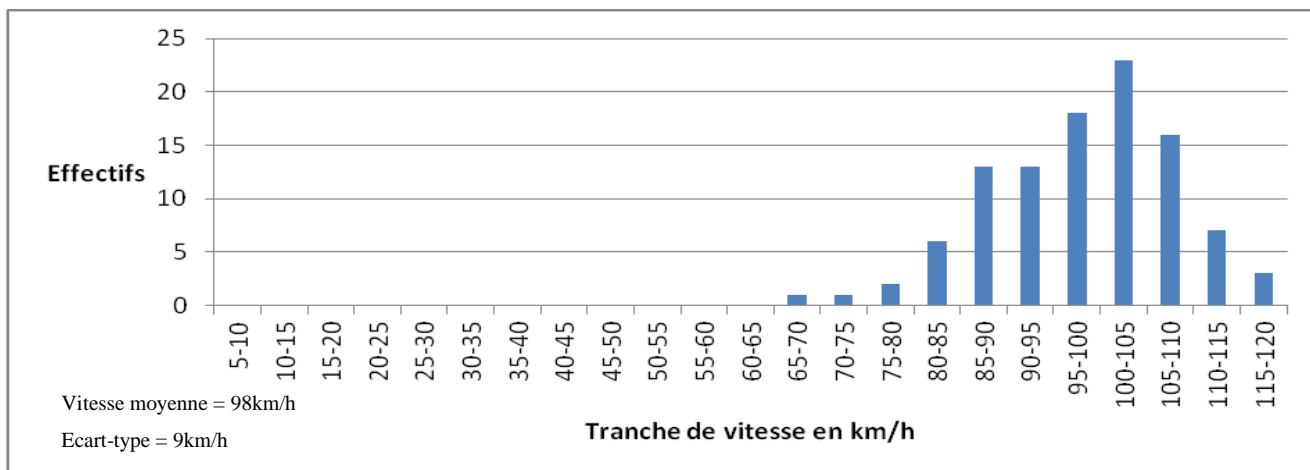


Figure 65 Effectifs des vitesses observées sur les routes de type Quasi-Autoroute

Dans la figure 65, on constate une distribution serrée. Un pic est observé sur la tranche 100-105km/h. Peu d'observations sont enregistrées sur ce type de route.

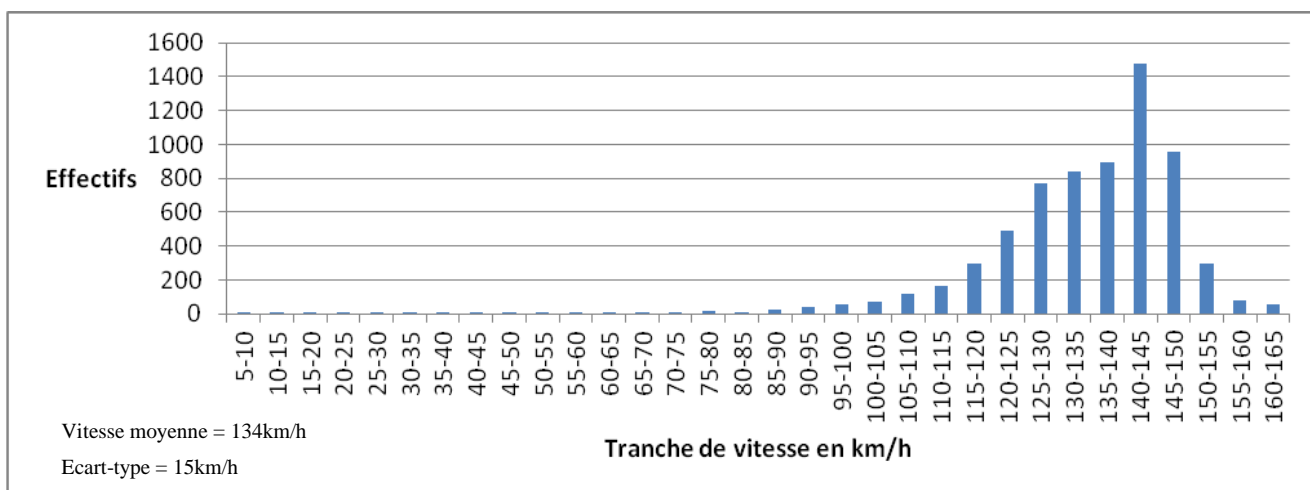


Figure 66 Effectifs des vitesses observées sur les routes de type Autoroute

Dans la figure 66, on a une distribution bien serrée et avec un seul mode. Un pic est observé sur la tranche 140-145km/h.

4.2.1.6 Impact des feux tricolores sur la variation de la vitesse

Dans cette section, nous allons étudier la variation de la vitesse observée sur les tronçons de trajectoires des interventions à proximité des feux tricolores. Notre but est de pouvoir étudier si les feux tricolores peuvent provoquer des ralentissements de vitesses.

Dans cette étude, nous avons importé les positions des feux tricolores de la base de données géographiques libre « OpenStreetMap ». On précise que l'étude a été réalisée sur une dizaine de positions de feux tricolores localisés au centre-ville du Mans.

Pour la réalisation de notre étude, nous avons adopté la démarche suivante :

- On définit trois types de tronçon trajectoire : avant le passage, à proximité et après le passage des feux tricolores. Chacun de ces tronçons est caractérisé par une vitesse. Dans l'exemple présenté dans la figure 67, T1 sera le tronçon avant le feu tricolore avec une vitesse v_1 , T2 est le tronçon à proximité avec une vitesse v_2 et enfin T3 sera le tronçon après le feu tricolore et avec une vitesse v_3 . On rappelle qu'un tronçon trajectoire est délimité par deux enregistrements successifs du GPS.

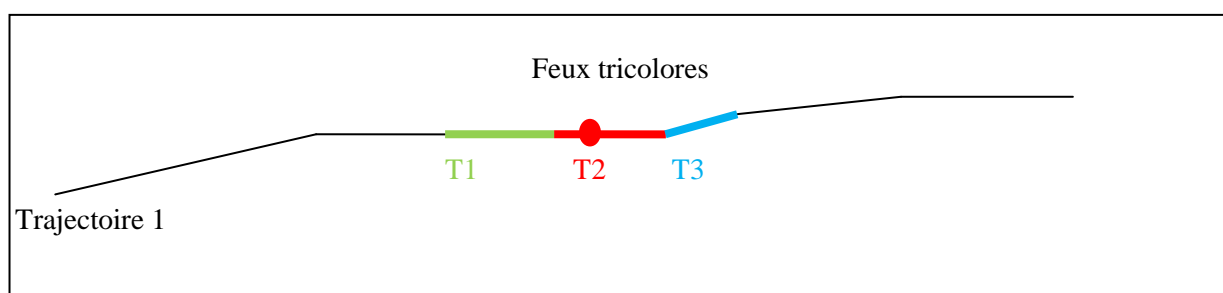


Figure 67 Exemple de principe d'analyse d'impact de feu tricolore sur la variation de la vitesse

- Dans la deuxième étape de notre approche, on détermine pour chaque feu tricolore étudié et pour toutes les trajectoires qui passent à proximité la différence, notée V_{avant} , entre la vitesse observée sur le tronçon avant le feu (V_1) et celle à proximité de celui-ci (V_2) d'une part, et la différence, notée $V_{après}$, entre la vitesse observée sur le tronçon à proximité (V_2) et celle à après le feu tricolore (V_3) d'autre part. Par la suite, on détermine le maximum, le minimum et la moyenne des vitesses V_{avant} et $V_{après}$. Dans le tableau suivant, on présente un récapitulatif de nos résultats.

| Feux tricolores | « 7h-9h » | « 11h30-14h » | « 16h30-19h » | « Reste de la journée » |
|-----------------|-----------|---------------|---------------|-------------------------|
| max en km/h | 18 | 19.02 | 17.72 | 17.41 |
| min en km/h | 1.22 | 0.09 | 0.22 | 0.52 |
| Moyenne en km/h | 9.61 | 9.55 | 8.97 | 8.9 |

Tableau 7 Impact des feux tricolores sur la variation de la vitesse

Ce qu'on peut tirer de cette analyse, c'est que l'influence de la signalisation sur la variation de la vitesse reste globalement faible, et indifférente par rapport aux différents moments de la journée, ce

qui la rend négligeable dans l'estimation du temps de parcours. En conséquence, la présence ou pas des feux tricolores ne sera pas incluse dans l'analyse multicritère. Cette constatation est très importante par la suite lors de la définition du graphe pour le calcul d'itinéraire.

4.2.2 Analyse multicritères

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons dressé plusieurs histogrammes des effectifs des vitesses observées selon les tranches horaires et quelques caractéristiques physiques du réseau routier (la largeur des chaussées, le nombre et l'importance de la voie, etc). Notre but était d'étudier l'impact de ces facteurs sur la variation de la vitesse observée.

Après avoir étudié chaque facteur à part, seul le facteur lié à la présence ou pas des feux tricolores sur les tronçons routiers sera exclu de notre étude. Nous estimons qu'une combinaison des classes des facteurs retenus pourra améliorer la fiabilité des estimations du temps de parcours.

Notre idée est de trouver des histogrammes des effectifs des vitesses dont la distribution est serrée et avec un seul mode si possible. Parmi les différentes combinaisons pouvant être définies, on recherche celle qui explique le mieux les vitesses observées. Par exemple, si on utilise les cinq facteurs, compte tenu du nombre des classes existantes pour chacun d'entre eux, on pourrait aboutir à 1280 classes, dont par exemple la combinaison 1, telle que Combinaison 1 : (P0, CL1, I1, N1, n1) (Figure 68).

L'histogramme issu de la Classe 1 peut être lu de la façon suivante :

- P0 correspond à la tranche horaire « reste de la journée »,
- CL1 pour les largeurs des chaussées qui sont comprises entre 2 et 4 mètres,
- I1 désigne l'importance de la voie qui est égale à 1,
- N1 correspond à une route dont le nombre de voie est égal à 1,
- n1 désigne une autoroute comme nature de voie.

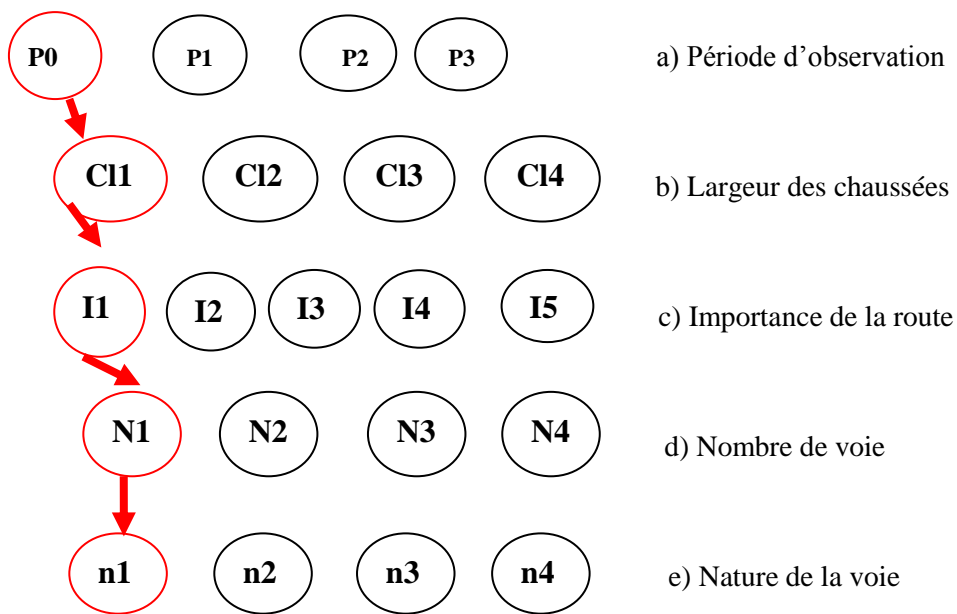


Figure 68 Les facteurs considérés dans l'analyse multicritères

Il n'est pas possible d'étudier toutes les combinaisons possibles, nous risquons d'avoir des histogrammes et des classes qui présentent des similarités avec d'autres et pourraient donc être regroupées. Pour résoudre ce problème, notre idée consiste à réaliser une étude d'analyse statistique descriptive multidimensionnelle. Nous allons dégager les corrélations qui peuvent exister entre ces facteurs. On va privilégier les facteurs qui ont une faible corrélation entre eux. Le but est de réduire le nombre des facteurs à étudier. Afin d'avoir une meilleure combinaison entre les classes des facteurs retenus, nous appliquons un algorithme de classification. Nous allons générer un arbre et des règles de décision basées sur les classes des facteurs retenus.

4.2.2.1 Choix de la méthode statistique descriptive multi dimensionnelles

Dans son rapport, (Baccini, 2010) désigne la statistique descriptive multi dimensionnelle par « l'ensemble des méthodes statistiques descriptives permettant de traiter simultanément un ensemble de variables » (il s'agit d'étudier plus de deux variables). Le but d'utiliser cette méthode est de pouvoir dégager la corrélation entre les différents facteurs étudiés.

Dans l'analyse statistique descriptive multi dimensionnelle, on distingue deux méthodes : l'Analyse Factorielle des Correspondances (A.F.C.) et l'Analyse des Correspondances Multiple (A.C.M.).

La méthode ACP permet de traiter simultanément un nombre de variables de types quantitatives. Par contre, la méthode ACM est utilisée lorsqu'on a au moins deux variables de types qualitatives. Concernant notre étude, les variables à étudier sont définies comme ci-après :

- ✓ les tranches horaires avec quatre classes : (« 7h-9h », « 11h30-14h », « 16h30-19h » et « reste de la journée »),

- ✓ la largeur des chaussées avec quatre classes : [2 ; 5] mètres,] 5 ; 7] mètres,] 7 ; 10,5] et] 10,5 ; 17] mètres,
- ✓ l'importance de la route avec cinq classes : de 1 à 5. La classe de l'importance de la route est définie selon la nature du tronçon routier.
- ✓ le nombre de voies avec quatre classes : de 1 à 4,
- ✓ la nature de la route avec cinq classes:(« Autoroute », « Bretelle », « Quasi-autoroute », « Route à 1 chaussée », « Route à 2 chaussées »),
- ✓ la classe administrative du tronçon routier avec trois classes:« Autoroute », « Départementale », « Autre ».

Les variables à expliquer concernent les tranches des vitesses observées dans la tranche horaire « reste de la journée ». Le choix de cette tranche horaire est justifié par l'idée d'éviter au maximum les effets de la congestion récurrente comme les embouteillages. On définit quatre classes :

- ✓ vitesse_acm-v1 : la vitesse est inférieure ou égale à 42 km/h,
- ✓ vitesse_acm-v2 : la vitesse est supérieure à 42 km/h et inférieure ou égale à 93 km/h,
- ✓ vitesse_acm-v3 : la vitesse est supérieure à 93 km/h et inférieure ou égale à 113km/h,
- ✓ vitesse_acm-v4 : la vitesse est supérieure à 113km/h.

On précise que les seuils de ces classes sont déterminés à partir d'une observation sur la courbe de la vitesse moyenne en fonction de la largeur des chaussées (figure 47). Le choix de la création des classes des vitesses en fonction de ce critère est basé sur les résultats de l'analyse monocritère (section 4.3.1). En effet, en observant les différentes distributions des vitesses en fonction des classes des différents facteurs retenus, nous avons constaté que les histogrammes des vitesses générés en fonction des classes de la largeur des chaussées ont généralement des distributions serrées et avec un seul mode à l'exception de la classe 2.

Après avoir énuméré toutes les variables retenues dans notre projet, nous constatons qu'on a uniquement des variables de types qualitatives, d'où la nécessité d'utiliser la méthode ACM pour le reste de notre analyse.

4.2.2.2 Discussion et analyse des résultats d'application de la méthode ACM

Dans cette section, nous présentons notre étude pour la détermination des facteurs qui vont être réutilisés dans le processus de la création des règles de décisions pour la prédiction du temps de parcours. Suite à l'application de la méthode ACM, nous avons déterminé la matrice de corrélation présentée dans la figure 69 entre les différents facteurs présentés dans la section (4.3.2.1). Grâce à cette matrice, nous pouvons déterminer les coefficients de corrélations des variables prises deux à deux. Dans la matrice, on distingue deux types de corrélations : positifs et négatifs. Pour la suite de notre étude, on s'intéresse aux coefficients positifs de corrélations.

L'ordre de corrélation positif entre les variables prises deux à deux est un ordre décroissant en fonction des couleurs choisies : rouge, jaune foncé, et jaune. La couleur bleue foncée et bleue claire concernent l'ordre de corrélation négatif.

| Variables | vitesse_acm-v1 | vitesse_acm-v2 | vitesse_acm-v3 | vitesse_acm-v4 |
|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| vitesse_acm-v1 | 1 | -0,582390545 | -0,304750299 | -0,275966889 |
| vitesse_acm-v2 | -0,582390545 | 1 | -0,319455726 | -0,289283401 |
| vitesse_acm-v3 | -0,304750299 | -0,319455726 | 1 | -0,151374716 |
| vitesse_acm-v4 | -0,275966889 | -0,289283401 | -0,151374716 | 1 |
| l_chausseesacm-l1 | 0,336452547 | 0,022818913 | -0,25345529 | -0,256445935 |
| l_chausseesacm-l2 | -0,28454101 | 0,070105072 | 0,267239882 | 0,026765816 |
| l_chausseesacm-l3 | -0,02490371 | -0,134662235 | -0,013848532 | 0,252194655 |
| l_chausseesacm-l4 | -0,089971292 | -0,105885406 | -0,047876304 | 0,341678309 |
| nb_voiesacm-nb1 | 0,164784401 | -0,020774898 | -0,086183729 | -0,118821556 |
| nb_voiesacm-nb2 | -0,114415691 | 0,073249396 | 0,096540973 | -0,04463084 |
| nb_voiesacm-nb3 | -0,113351872 | -0,120398327 | -0,029000603 | 0,377402261 |
| nb_voiesacm-nb4 | 0,033897235 | -0,026850883 | -0,019939942 | 0,01157713 |
| importanceacm-l1 | -0,047304952 | -0,181330013 | -0,073962068 | 0,419367785 |
| importanceacm-l2 | -0,222540165 | -0,032976882 | 0,21916082 | 0,140843765 |
| importanceacm-l3 | 0,025224362 | 0,045386077 | 0,019250867 | -0,125456386 |
| importanceacm-l4 | 0,148291914 | 0,10116173 | -0,165983592 | -0,190386331 |
| importanceacm-l5 | 0,163367028 | -0,022093075 | -0,104815732 | -0,094726703 |
| nature_voies-Autoroute | -0,047304952 | -0,181330013 | -0,073962068 | 0,419367785 |
| nature_voies-Bretelle | -0,028913902 | 0,054529236 | -0,02739196 | -0,009230218 |
| nature_voies-Quasi-autoroute | -0,034207794 | -0,02234484 | 0,084174507 | -0,006923903 |
| nature_voies-Route à 1 chaussée | 0,142742833 | 0,023234372 | -0,021227779 | -0,221841344 |
| nature_voies-Route à 2 chaussées | -0,121218577 | 0,071765037 | 0,067994481 | -0,001696729 |
| cladmin-A | -0,047304952 | -0,181330013 | -0,073962068 | 0,419367785 |
| cladmin-Au | 0,183902945 | 0,136428197 | -0,216005154 | -0,241523679 |
| cladmin-D | -0,155926185 | -0,047445671 | 0,2435755 | 0,038107451 |

Figure 69 Matrice de corrélation entre les différentes classes des facteurs retenus

Pour étudier les relations entre les variables, nous suivons la démarche suivante :

- La première étape consiste à étudier la relation entre les tranches de vitesses (v1, v2, v3 et v4) et les autres variables. Seuls les facteurs qui ont une forte corrélation avec les tranches des vitesses seront retenus.

À l'issue de la première étape de notre approche, nous estimons que le facteur « largeur des chaussées » est le plus corrélé avec les tranches de vitesses. Par conséquent, seules les classes de la largeur des chaussées seront retenues pour la deuxième étape de notre approche. A titre d'exemple, on remarque que le coefficient de corrélation entre la classe 1 de la largeur des chaussées et la tranche de la vitesse v1 est de l'ordre de 0,33. Ce résultat est attendu puisque le découpage des tranches des vitesses est basé sur la courbe des vitesses moyennes en fonction de la largeur des chaussées.

- La deuxième étape consiste à étudier la corrélation entre le facteur retenu dans la première étape et le reste des facteurs. Seuls les facteurs ayant une faible corrélation avec les classes liées à la largeur des chaussées seront retenus pour le reste de notre étude.

À l'issue de la deuxième étape de notre approche, nous avons constaté que le facteur le moins corrélé avec les classes de la largeur des chaussées est le nombre de voies. Après avoir appliqué les deux étapes de notre méthodologie, les classes liées à la largeur des chaussées et au nombre de voies seront retenues pour l'étape de la prédiction du temps de parcours. L'algorithme de la classification se basera sur les classes liées à la largeur des chaussées, au nombre de voies et aux tranches horaires.

L'étude de notre base de données routière nous a permis de remarquer qu'un nombre significatif de tronçons routiers n'est pas renseigné au niveau de la largeur des chaussées et / ou du nombre de voies. Afin de résoudre ce problème, nous avons étudié de nouveau la corrélation entre les classes des tranches des vitesses et les autres facteurs. Nous constatons que les classes liées à l'importance des routes sont plus corrélées avec les classes des tranches des vitesses. Par conséquent, nous avons décidé d'appliquer l'algorithme de la classification seulement sur les tranches horaires et sur les classes liées à l'importance des routes.

Au total, l'algorithme de classifications sera appliqué à deux reprises. En premier lieu, on va générer un arbre de décisions pour la prédiction du temps de parcours basé sur les tranches horaires, les classes liées à la largeur des chaussées et le nombre de voies. Cependant, dans le cas où la largeur des chaussées et /ou le nombre de voies n'est pas renseigné(e), un deuxième arbre de décision sera généré. Il se basera sur les tranches horaires et les classes liées à l'importance des routes.

4.2.2.3 Génération des arbres de décision et des règles de bases

Le but de l'application d'un algorithme de classification découle du besoin d'avoir une meilleure combinaison entre les classes des facteurs liées aux tranches horaires, à la largeur des chaussées et au nombre de voies. Notre idée consiste à créer un arbre et des règles de décision qui seront utilisées pour prédire le temps de parcours.

D'après (Han et al., 2001), la construction d'un arbre de décision suit les étapes suivantes.

- 1) La création de l'arbre commence par la fixation du nœud racine parmi les éléments de la base de données A.
- 2) Le nœud se transforme en feuille dans le cas où les éléments appartiennent au même groupe.
- 3) Dans le cas où les éléments n'appartiennent pas au même groupe, le nœud sera découpé en sous-ensembles. Le découpage s'appuie sur des mesures de partitionnement.
- 4) Chaque nouveau nœud ajouté engendre une nouvelle branche et une évaluation de la mesure de partitionnement.

La création de l'arbre est récursive, elle s'arrête dans les cas suivants :

- Tous les attributs des éléments de la base de données A sont répartis.
- Tous les éléments sont répartis dans des groupes homogènes.

Pour la création de l'arbre et les règles de décisions, nous avons utilisé l'algorithme C4.5 développé par (Quinlan., 1993). Ce dernier prend en considération des variables de types discrets et continus.

Dans la figure 70, nous présentons les règles de décisions générées suite à une application de l'algorithme C 4.5. Les facteurs retenus dans la création du premier arbre sont : les tranches horaires, les largeurs des chaussées et le nombre de voies.

largeur_chaussees = 11: v2 (16760.0/7027.0)

largeur_chaussees = 12

nb_voies <= 2: v2 (63959.0/37798.0)

nb_voies > 2: v3 (170.0/55.0)

largeur_chaussees = 13

nb_voies <= 3

tranche_horaire = reste de la journée: v4 (2727.0/726.0)

tranche_horaire = 7h_9h: v2 (172.0/96.0)

tranche_horaire = 11h30_14h

nb_voies <= 2: v2 (142.0/89.0)

nb_voies = 3 : v4 (202.0/38.0)

tranche_horaire = 16h30_19h: v4 (1073.0/292.0)

nb_voies > 3: v1 (27.0)

largeur_chaussees = 14

nb_voies <= 2: v2 (602.0/201.0)

nb_voies = 3: v4 (4019.0/137.0)

nb_voies > 3: v2 (225.0/90.0)

Figure 70 Résultats d'application de l'algorithme de la création de l'arbre de décision

D'après les règles présentées dans l'arbre de décision, nous constatons que le facteur temporel n'a une influence que lorsque la largeur des chaussées appartient à la classe 13 (largeurs comprises entre 7 et 10,5 mètres) et lorsque le nombre de voies est inférieur ou égal à trois mètres. Concernant les autres classes, la même tranche de vitesse sera utilisée pour chaque tranche horaire. Pour la classe 11 par exemple, la tranche de vitesse v2 sera la même pour les tranches horaires (« reste de la journée », « 7h - 9h », « 11h30 - 14h », « 16h30 - 19h »).

Concernant la génération du deuxième arbre de décision, les facteurs retenus sont : les tranches horaires et les classes de l'importance de la route. Dans la figure 71, nous présentons l'arbre de décision généré suite à l'application de l'algorithme de la classification C4.5.

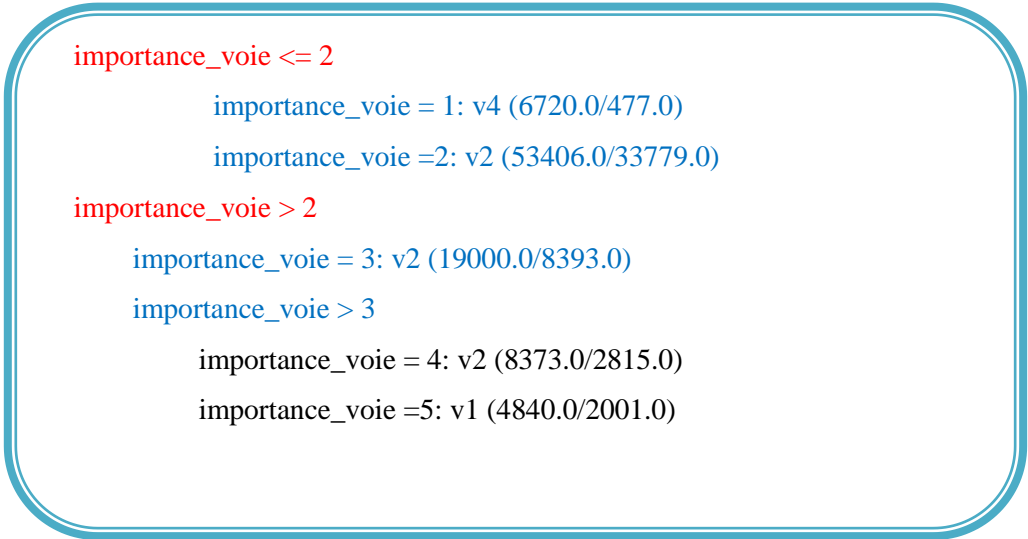


Figure 71 Résultats d'application de l'algorithme de la création de l'arbre de décision

D'après les règles de décisions présentées dans la figure 71, nous remarquons essentiellement que le facteur lié aux tranches horaires n'est pas pris en compte par l'algorithme de classification. Afin de visualiser le résultat de l'application de notre méthode d'enrichissement, nous présentons quatre cartes routières enrichies par des vitesses observées dans les tranches horaires retenues dans notre projet. Nous proposons une visualisation centrée sur le centre-ville du Mans.

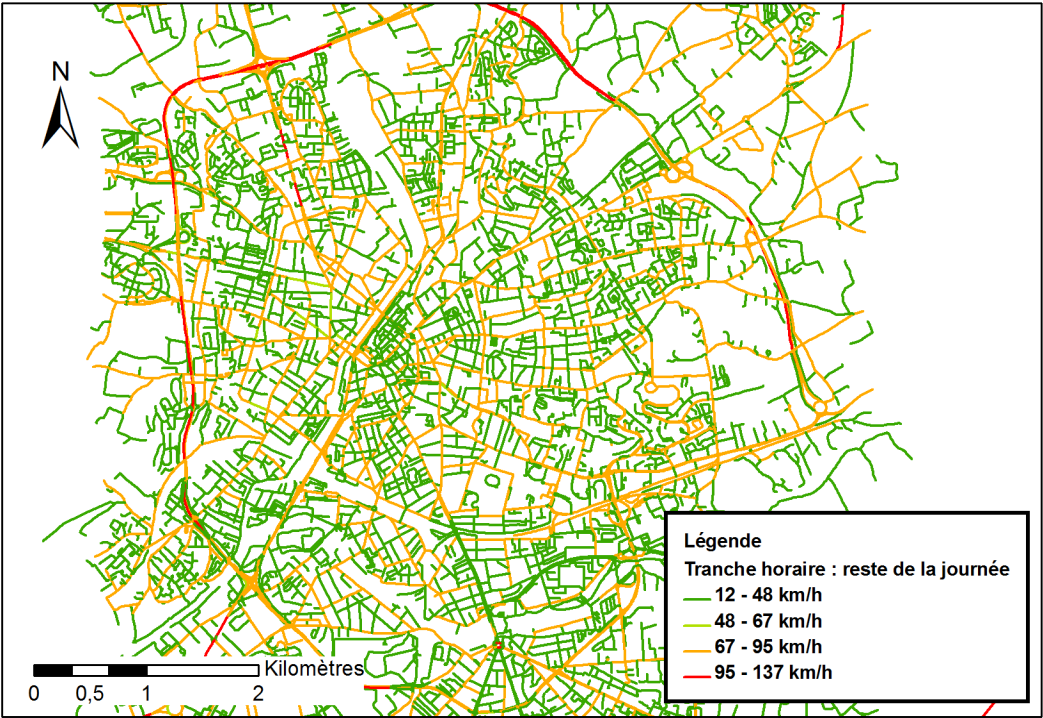


Figure 72 Carte routière enrichie par des vitesses observées dans la tranche horaire « reste de la journée »

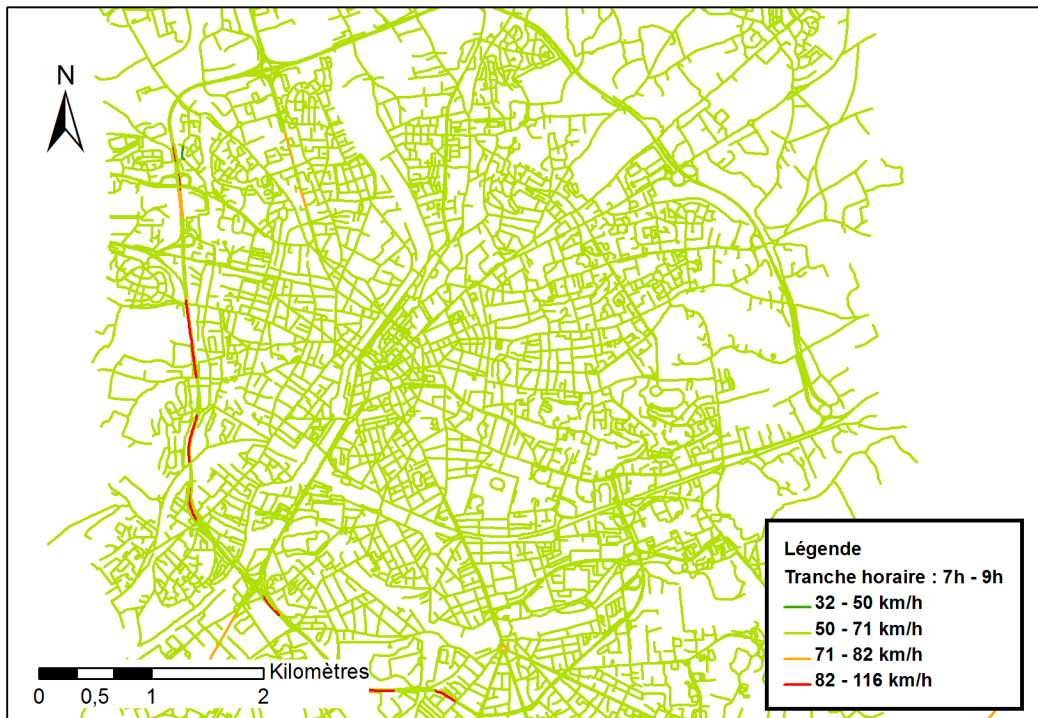


Figure 73 Carte routière enrichie par des vitesses observées dans la tranche horaire « 7h-9h »

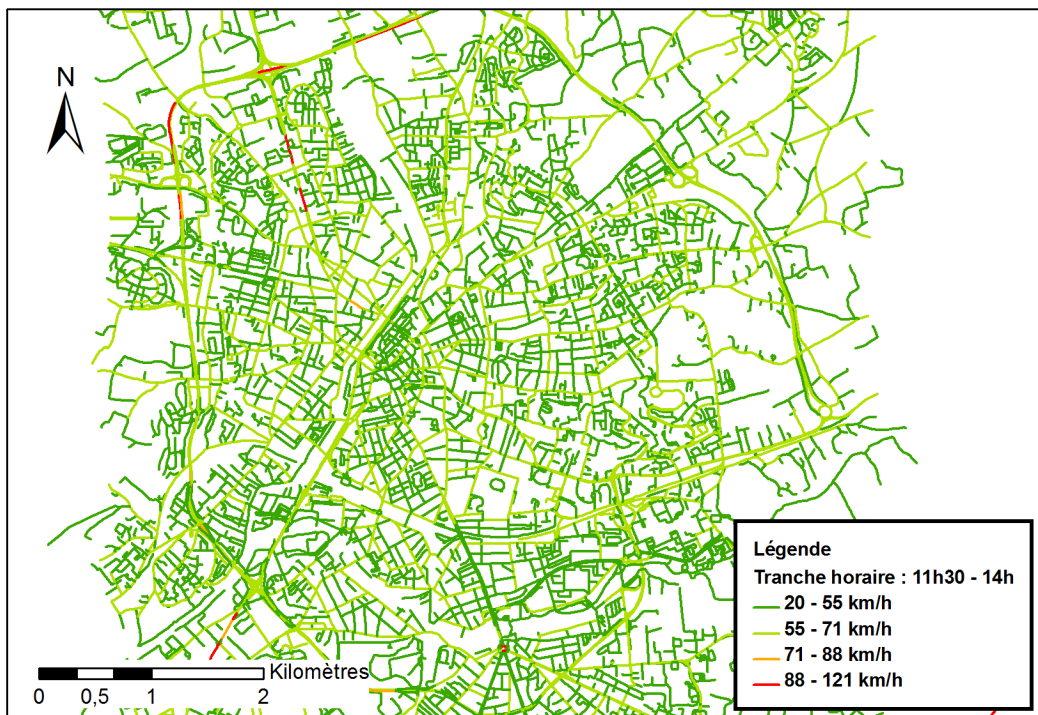


Figure 74 Carte routière enrichie par des vitesses observées dans la tranche horaire « 11h30_14h »

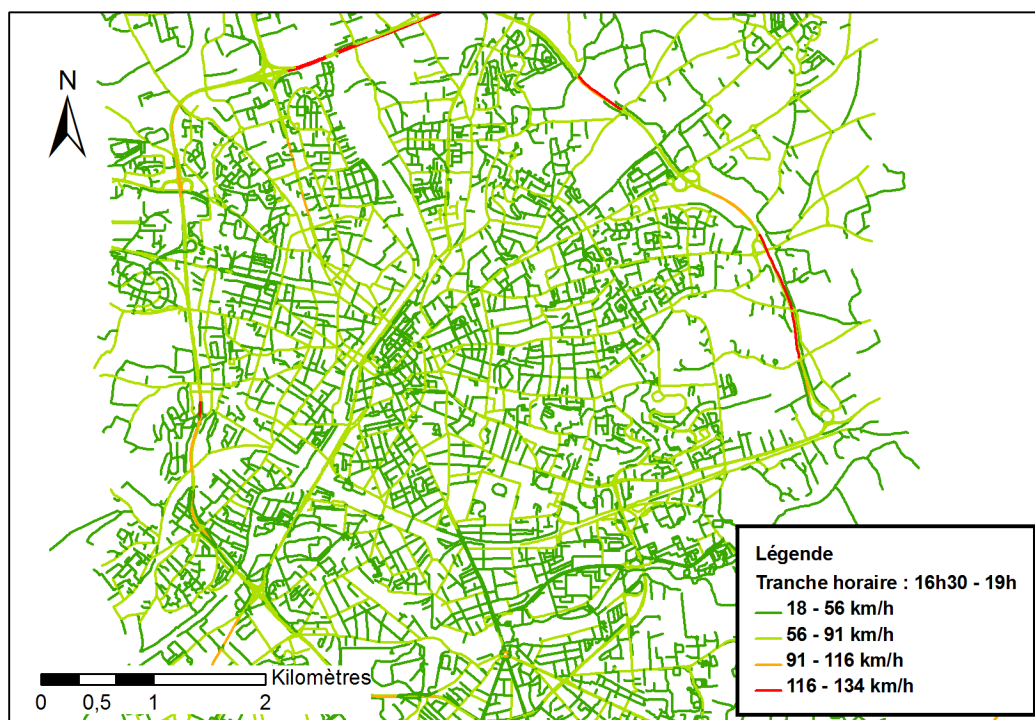


Figure 75 Carte routière enrichie par des vitesses observées dans la tranche horaire « 16h30_19h »

A partir des cartes routières présentées dans les figures 72, 73, 74 et 75, on constate l'impact du changement des tranches horaires sur la variation de la vitesse. Dans la tranche horaire « reste de la journée », on remarque un nombre significatif de vitesses observées sur des tronçons routiers dans la tranche 95-137 km/h, ce qui n'est pas le cas pour les observations des vitesses enregistrées dans les autres tranches horaires.

Dans la tranche horaire « 7h-9h », la majorité des observations des vitesses varient dans la tranche 50-71 km/h. Peu d'observations sont enregistrées dans la tranche « 82-116 km/h ».

Concernant les vitesses enregistrées dans les tranches horaires « 11h30-14h » et « 16h30-19h », on constate une forte ressemblance puisque les vitesses varient généralement entre 20 km/h et 91km/h.

4.2.3 Fiabilité des estimations de vitesses de parcours

Dans (Certu, 2008), les auteurs définissent la fiabilité des temps de parcours associée à un itinéraire comme étant la probabilité que le temps de parcours réellement mis soit égal à celui estimé ou prévu avec un pourcentage d'incertitude autorisé. Ils précisent aussi que la fiabilité des temps de parcours peut être jugée en se basant sur la distribution statistique et sa variance.

Dans cette section, nous présentons une approche ayant pour but d'évaluer notre méthode d'estimation de vitesses de parcours. Elle se décline en deux étapes : par méthode d'enrichissement et par une évaluation globale.

✓ Evaluation par méthode d'enrichissement

Dans cette étape d'évaluation, nous étudions la fiabilité des estimations de vitesses de parcours issues des deux méthodes d'enrichissements : directe et indirecte.

- Evaluation par méthode directe :

Pour évaluer les mesures issues de la méthode directe, notre idée consiste à observer des vitesses moyennes ainsi que leurs écarts-types pour plusieurs tronçons routiers. Le but sera d'évaluer pour chaque observation de la vitesse son indice de dispersion (le rapport entre l'écart-type et la vitesse moyenne). La classification des tronçons routiers retenue est basée sur les tranches horaires « reste de la journée », « 7h-9h », « 11h30-14h », « 16h30-19h » et des tronçons routiers dont la largeur des chaussées est supérieure ou égale à 2 mètres et inférieure ou égale à 5 mètres. Dans notre étude, on se limite à cinq passages (nombre de trajectoires) pour chaque tronçon routier.

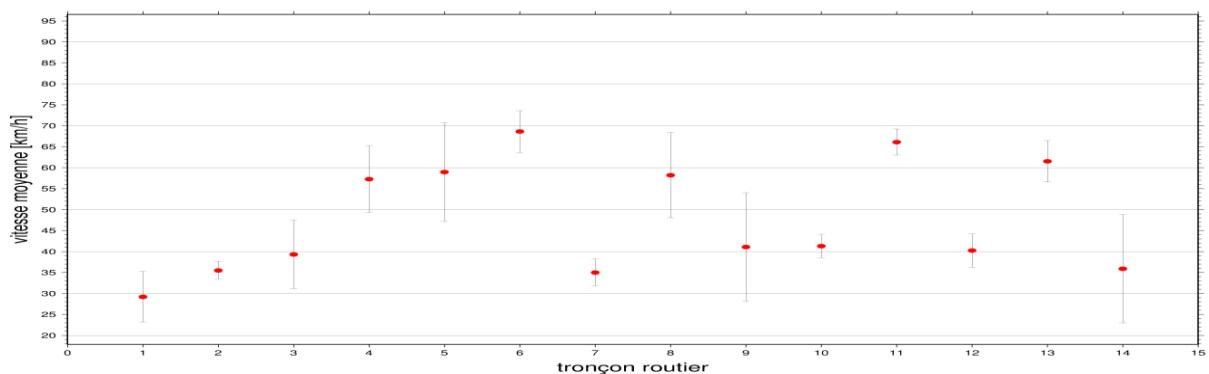


Figure 76 Vitesses moyennes et écart-types observés dans la tranche horaire « reste de la journée » et sur des routes dont la largeur des chaussées est supérieure ou égale à 2 mètres et inférieure ou égale à 5 mètres.

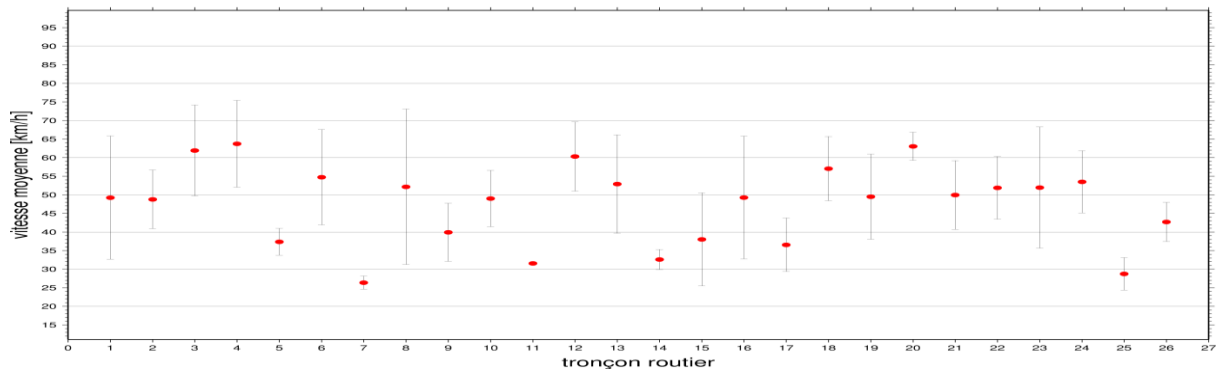


Figure 77 Vitesses moyennes et écart-types observés dans la tranche horaire « 7h-9h » et sur des routes dont la largeur des chaussées est supérieure ou égale à 2 mètres et inférieure ou égale à 5 mètres.

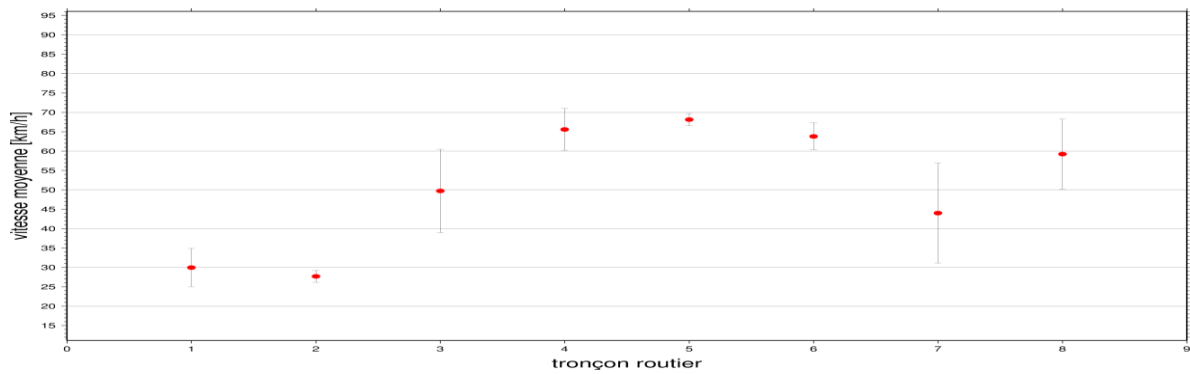


Figure 78 Vitesses moyennes et écart-types observés dans la tranche horaire « 11h30-14h » et sur des routes dont la largeur des chaussées est supérieure ou égale à 2 mètres et inférieure ou égale à 5 mètres.

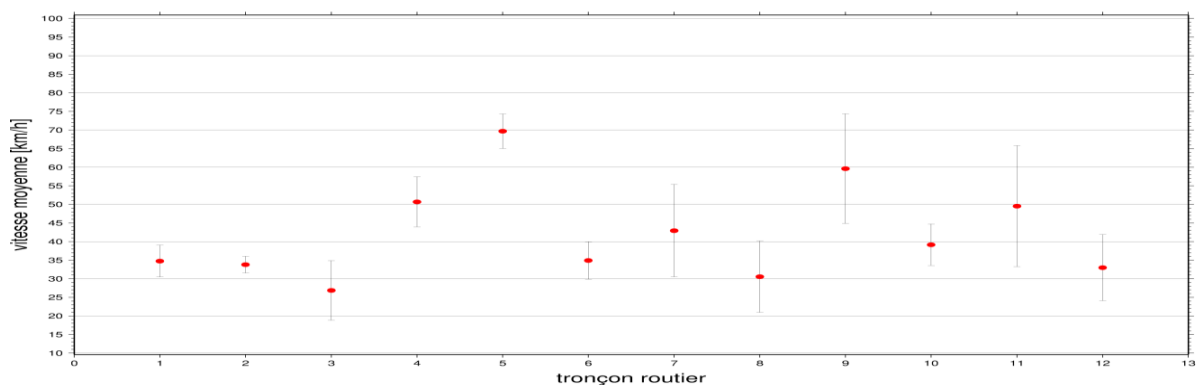


Figure 79 Vitesses moyennes et écart-types observés dans la tranche horaire « 16h30-19h » et sur des routes dont la largeur des chaussées est supérieure ou égale à 2 mètres et inférieure ou égale à 5 mètres.

Pour les observations des vitesses moyennes présentées dans la figure 76, l'indice de dispersion varie au minimum de 5% jusqu'à 36%. Concernant les autres observations enregistrées dans les figures 77, 78 et 79, l'indice de dispersion varie au minimum de 1% jusqu'à 40%.

Ces résultats sont prévisibles puisque notre base contient actuellement environ 300 trajets d'interventions.

- Evaluation de la méthode indirecte :

L'évaluation de la méthode indirecte se base sur les points suivants :

- ✓ La détermination du pourcentage de la répartition des éléments dans les deux arbres de décisions.
- ✓ L'évaluation de l'indice de dispersion pour chaque règle de décisions.
- ✓ La régénération des histogrammes des effectifs des vitesses selon les règles de décisions.

Par application de l'algorithme C 4.5, nous avons constaté que 50% et 48% des éléments sont bien répartis respectivement dans le premier et le deuxième arbre. Le deuxième point d'évaluation de la méthode indirecte consiste à évaluer chaque indice de dispersion et ceci pour chaque règle de décision. Dans les figures 80 et 81, nous présentons les valeurs des vitesses moyennes, les écarts-types et les indices de dispersions pour chaque règle de décision des deux arbres.

En observant les indices de dispersions présentés dans le premier arbre de décision, on constate que l'indice peut atteindre une valeur maximale de 45% et minimale de 12%. Au niveau des règles basées sur les tranches horaires, on remarque que l'indice de dispersion peut atteindre au maximum 25%.

Concernant le deuxième arbre, la valeur de l'indice de dispersion peut atteindre au maximum 58% et au minimum 11%. De plus, dans le deuxième arbre de décision, on constate que l'indice de dispersion augmente avec l'augmentation du degré de l'importance.

largeur_chaussees = 11: v2 (16760.0/7027.0) Vitesse [29-77], I=45%

vitesse moyenne=53 km/h , écart type =24 km/h

largeur_chaussees = 12

nb_voies <= 2: v2 (63959.0/37798.0) Vitesse [59- 117], I=31%

vitesse moyenne = 88 km/h, écart type =29 km/h

nb_voies > 2: v3 (170.0/55.0) Vitesse [80-104], I= 12%

vitesse moyenne =92 km/h, écart type =12km/h

largeur_chaussees = 13

nb_voies <= 3

tranche_horaire = reste de la journée: v4 (2727.0/726.0)

Vitesse [95-145], I =20%, vitesse moyenne=120 km/h, écart type =25km/h

tranche_horaire = 7h_9h: v2 (172.0/96.0)

Vitesse [73-123], I =25%, vitesse moyenne =98 km/h, écart type =25km/h

tranche_horaire = 11h30_14h

nb_voies <= 2: v2 (142.0/89.0)

Vitesse [98-146], I =19%, vitesse moyenne =122 km/h, écart type =24km/h

nb_voies =3 : v4 (202.0/38.0)

Vitesse [86-142], I =24%, vitesse moyenne =114 km/h , écart type =28km/h

tranche_horaire = 16h30_19h: v4 (1073.0/292.0)

Vitesse [98- 146], I =19%, vitesse moyenne =122 km/h, écart type =24 km/h

nb_voies > 3: v1 (27.0) vitesse [25-33], I=13%, vitesse moyenne=29 km/h, écart type=4

largeur_chaussees = 14

nb_voies <= 2: v2 (602.0/201.0)

vitesse [57-97], I =25%, vitesse moyenne =77 km/h, écart type =20 km/h

nb_voies = 3: v4 (4019.0/137.0)

vitesse [124-148], I =8%, vitesse moyenne=136 km/h, écart type=12km/h

nb_voies > 3: v2 (225.0/90.0)

vitesse [45-105], I =40%, vitesse moyenne =75 km/h , écart type =30km/h

Figure 80 Indice de dispersions des règles de décisions pour le premier arbre

importance_voie <= 2

importance_voie = 1: v4 (6720.0/477.0)

vitesse moyenne =134km/h, écart type = 15km/h, indice de dispersion=11%

importance_voie =2: v2 (53406.0/33779.0)

vitesse moyenne = 91km/h, écart type =28km/h indice de dispersion=30%

importance_voie > 2

importance_voie = 3: v2 (19000.0/8393.0)

vitesse moyenne =69 km/h, écart type =29 km/h indice de dispersion =42%

importance_voie > 3

importance_voie = 4: v2 (8373.0/2815.0)

Vitesse moyenne =55 km/h, écart type =22 km/h, indice de dispersion=40%

importance_voie =5: v1 (4840.0/2001.0)

vitesse moyenne =41 km/h, écart type =24km/h, indice de dispersion=58%

Figure 81 Indice de dispersions des règles de décisions pour le deuxième arbre

Il est à noter que, pour chaque règle de décisions des deux arbres, nous avons fixé l'intervalle de l'incertitude de la vitesse moyenne par la façon suivante :

[vitesse moyenne - écart type, vitesse moyenne + écart type].

Lorsque l'on dispose d'une distribution des vitesses qui suit une loi gaussienne, la probabilité pour que la vitesse soit incluse dans cet intervalle est d'environ 68%. En pratique, on dresse la fonction de sa répartition empirique. L'intervalle de l'incertitude de la vitesse est rectifié de façon à avoir une probabilité de 68%.

Prenons l'exemple de la distribution des vitesses observées dans la classe II du premier arbre de décision (figure 82).

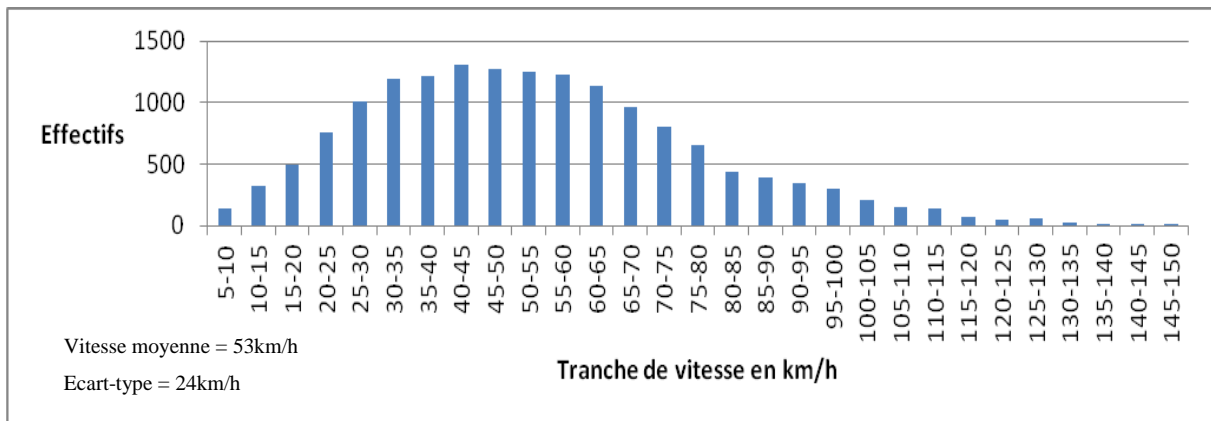


Figure 82 Effectifs des vitesses observées sur des routes dont la largeur des chaussées appartient à la classe I1 du premier arbre de décision

À partir de la figure 82, on constate que la distribution suit une loi gaussienne. Par conséquent, il est judicieux de fixer un intervalle d'incertitude pour la vitesse moyenne en se basant sur son écart-type. On aura alors un intervalle d'incertitude comme suit : [29- 77 km/h].

Prenons un deuxième exemple de la distribution des vitesses générées par le deuxième arbre de décision et sur des routes dont l'importance est égale à 2 (figure 83). A partir de l'histogramme présenté dans la figure suivante, nous remarquons une distribution très étendue avec deux modes. La vitesse moyenne calculée à partir de cette distribution est égale à 91 km/h, tandis que l'intervalle de l'incertitude est comme suit [63- 119km/h].

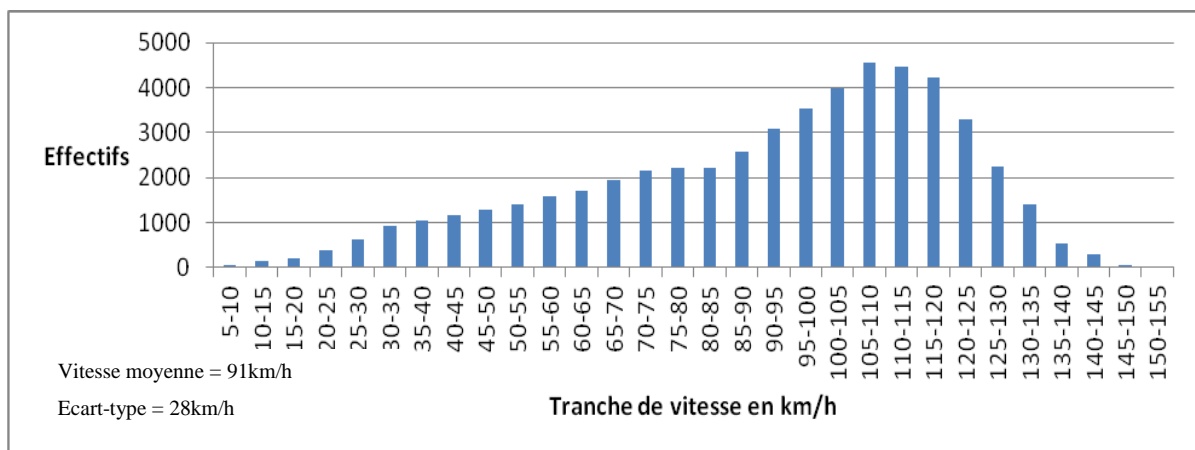


Figure 83 Effectifs des vitesses observées sur des routes dont l'importance est égale à 2

Afin de rectifier l'intervalle de l'incertitude, nous dressons la fonction de la répartition empirique des vitesses observées dans la figure 84.

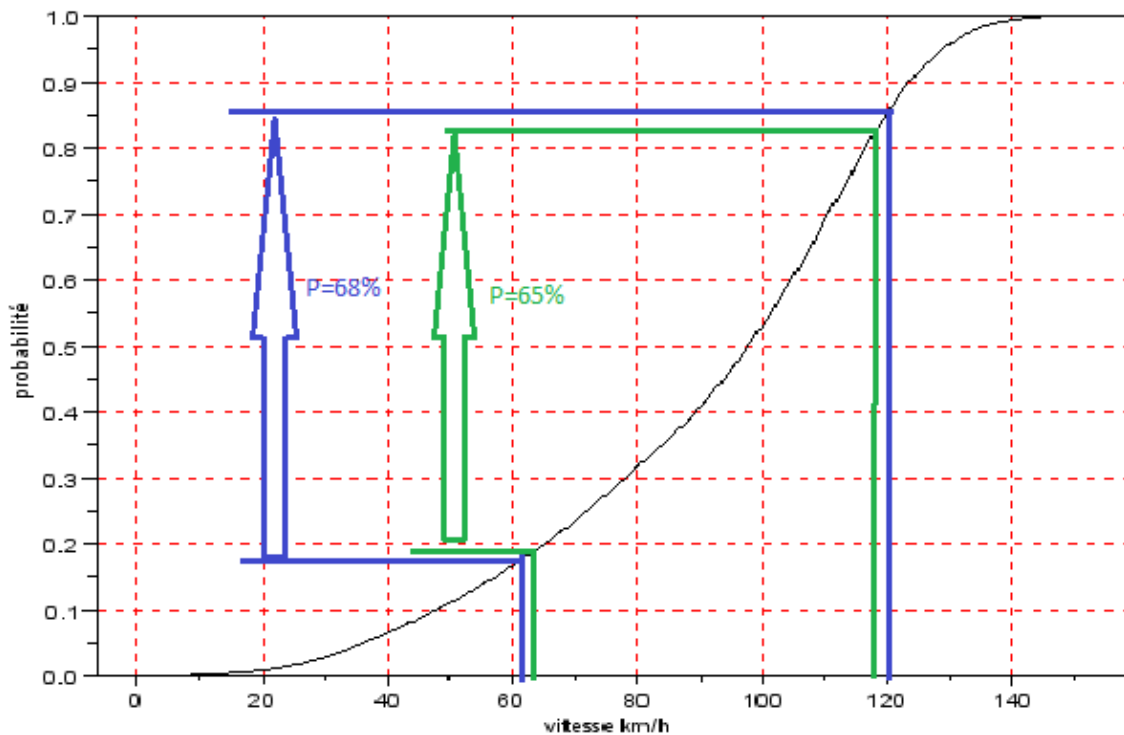


Figure 84 Répartition empirique des vitesses observées sur des routes dont l'importance est égale à 2

À partir de la figure 84, on constate que la probabilité d'avoir une valeur de la vitesse moyenne dans l'intervalle [63km/h- 119km/h] est de 65%. Pour cela, nous allons élargir l'intervalle de l'incertitude de la vitesse. Le but est de se rapprocher d'une probabilité de l'ordre de 68% qui correspond à celle de l'intervalle [vitesse moyenne – écart type, vitesse moyenne + écart type] pour la loi gaussienne. Dans notre exemple l'intervalle sera donc étendu à [62-120 km/h] et on aura en conséquence une probabilité de 68%.

Nous avons procédé de la même façon pour la rectification des intervalles d'incertitudes des vitesses pour les autres classifications.

✓ Evaluation par méthode globale

Pour l'évaluation globale du processus d'enrichissement de la base de données routières par des estimations des vitesses de parcours, notre idée se base sur la réalisation d'une comparaison entre des itinéraires proposés par notre calculateur et les trajectoires empruntées par le service d'urgence. Notre objectif consiste à déterminer le pourcentage de similarité et la différence en termes de temps de parcours entre les itinéraires proposés par notre calculateur et les trajectoires empruntées par le service d'urgence. Nous regarderons en parallèle les pourcentages d'enrichissement par méthodes directe et indirecte des tronçons routiers empruntés par l'itinéraire que propose notre calculateur. Nous estimons

que plus le nombre de tronçons enrichis par la méthode directe est important, plus on peut s'attendre à des valeurs de vitesses proches de la réalité locale.

Avant de commencer notre étude, nous présentons un récapitulatif des pourcentages d'enrichissement de la base de données routière par chaque méthode directe et indirecte (figure 85) et dans chaque tranche horaire (tableau 8). Pour la méthode directe, on précise que le nombre de passage sur un tronçon routier et dans chaque tranche horaire est fixé à deux passages.

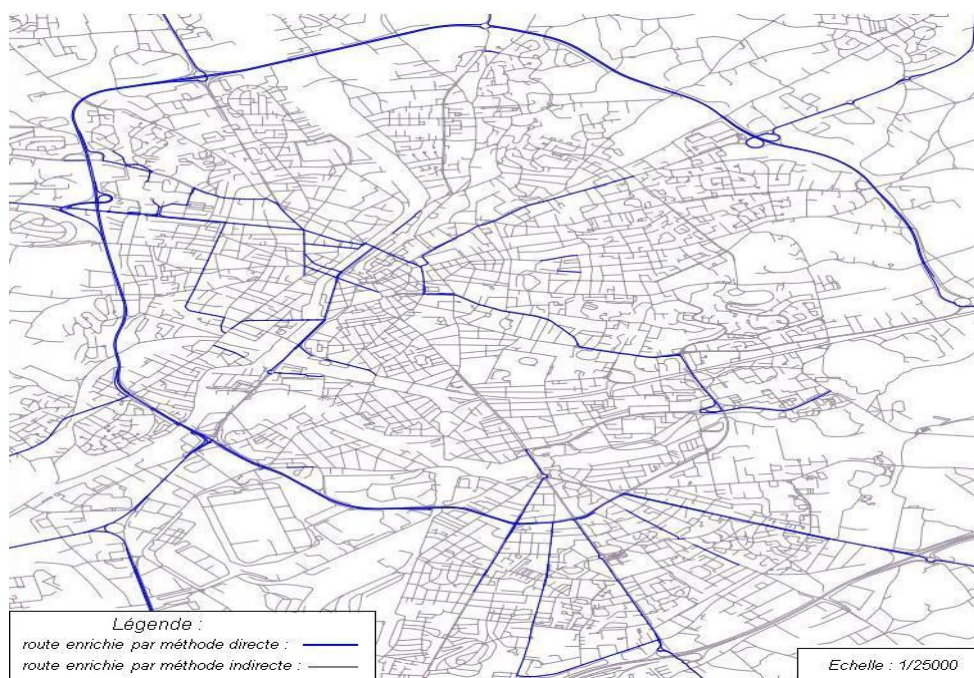


Figure 85 Route enrichie par les méthodes directe et indirecte

| Méthode d'enrichissement | | Pourcentage d'enrichissement dans chaque tranche horaire | | | |
|--------------------------|------------------------------------|--|-----------|---------------|---------------|
| | | « reste de la journée » | « 7h-9h » | « 11h30-14h » | « 16h30-19h » |
| Méthode directe | | 2% | 1% | 0,5% | 1% |
| Méthode indirecte | 1 ^{er} arbre de décision | 52% | 52,5% | 52,75% | 52,5% |
| | 2 ^{ème} arbre de décision | 46% | 46,5% | 46,75% | 46,5% |

Tableau 8 Récapitulatifs des pourcentages par méthode d'enrichissement pour chaque tranche horaire

A partir du tableau 8, on constate bien que le pourcentage d'enrichissement par la méthode directe est très faible par rapport à la méthode indirecte. On remarque aussi que le pourcentage d'enrichissement basé sur les règles de décisions issues du premier arbre est légèrement supérieur à ceux qui sont issus du deuxième arbre. Afin de réaliser l'évaluation globale de notre méthode d'estimation du temps de parcours, nous suivons la démarche suivante :

La première étape consiste à déterminer le nœud de départ et d'arrivée de la trajectoire d'une intervention choisie. Dans un deuxième temps, on calcule le temps de parcours réalisé au cours de cette intervention.

Dans la troisième étape, on lance un algorithme de recherche du plus rapide chemin avec le même point de départ et d'arrivée et aussi dans la même catégorie de tranche horaire que la trajectoire de l'intervention choisie. Pour réaliser cette tâche, nous avons utilisé l'algorithme de Dijkstra.

Enfin, dans la dernière étape de notre démarche, nous déterminons le pourcentage de similarité et la différence en termes de temps de parcours entre les itinéraires retournés par notre moteur de recherche et les trajectoires effectuées au cours des interventions (figure 86).

En ce qui concerne la phase de l'évaluation de notre calculateur, nous avons choisi douze itinéraires bien appariés avec le réseau routier. Dans le tableau 9, nous présentons nos résultats de comparaisons entre les itinéraires générés par notre calculateur et les trajectoires empruntées par le service d'urgence au cours de leurs interventions. On précise que les trajectoires choisies pour cette étude ne sont pas prises en compte dans la phase de l'estimation du temps de parcours.

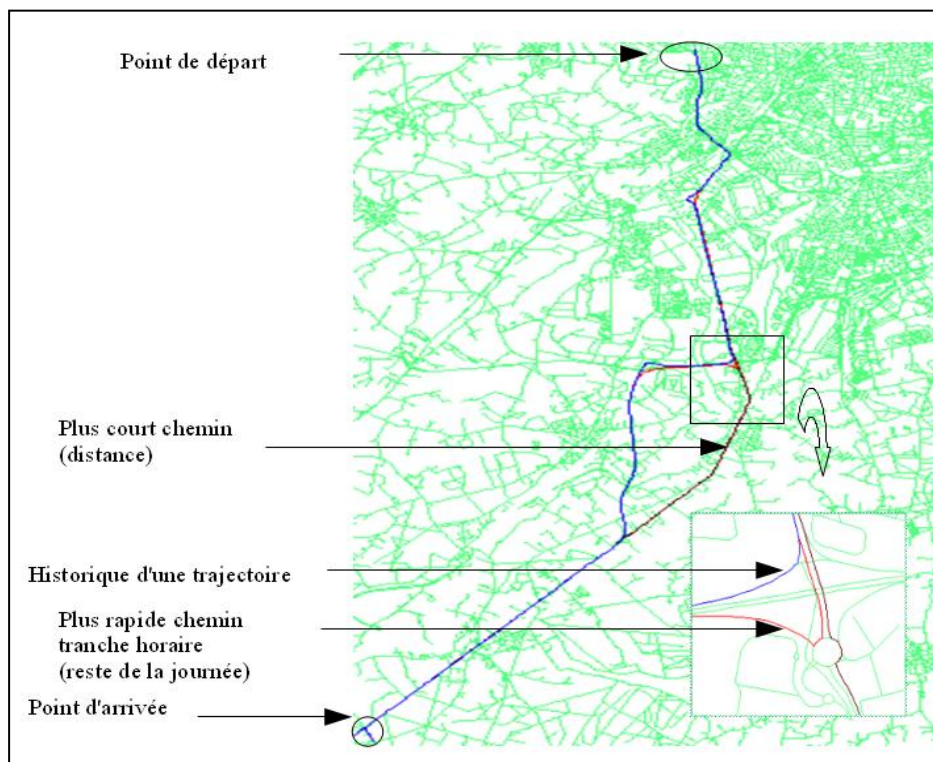


Figure 86 Application de l'algorithme de Dijkstra en fonction des tranches horaires

| Date et heure de l'intervention | Longueur de la trajectoire en (km) | Pourcentage de similarité | Différence en termes de temps de parcours en (minute/seconde) | Pourcentage d'enrichissement par la méthode directe | Pourcentage d'enrichissement par la méthode indirecte |
|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------|---|---|---|
| 2011-04-10 4 :44 | 41,894 | 96,6% | -2s | 97,9% | 0,3% |
| 2010-12-26 15 :18 :34 | 30,168 | 93,4% | +16s | 74,6% | 25,4 |
| 2011-02-03 21 :04 | 27,209 | 91,7% | +13s | 92,9% | 7,1% |
| 2011-04-30 21 :53 | 18,846 | 90,1% | -42s | 95,7% | 4,3% |
| 2011-02-08 16 :20 | 7,04 | 87,9% | +2min, 19s | 93% | 7% |
| 2010-12-08 22 :06 | 15,761 | 87,6% | +22s | 82,1% | 17,9% |
| 2011-04-13 09 :20 | 13,348 | 83,4% | +42s | 90,2% | 9,8% |
| 2011-03-08 09 :47 | 22,410 | 82,7% | -2min, 34s | 80% | 20% |
| 2011-04-09 20 :24 | 21,02 | 76,3% | -2min, 16s | 87,1% | 12,9% |
| 2010-12-01 13 :54 | 49,998 | 70,7% | +2,22s | 31,6% | 68,4% |
| 2011-03-12 10 :05 | 29,367 | 20% | -4min, 43s | 41% | 59% |
| 2010-12-11 15 :06 | 31,596 | 13,8% | -3min, 8s | 78% | 23% |

Tableau 9 Résultats de la comparaison entre les itinéraires proposés par notre calculateur et les trajectoires empruntées par le SMUR

L'une de nos hypothèses de travail est que les ambulanciers connaissent bien le terrain. Autrement dit, l'historique des trajectoires nous sert d'outil de validation de notre méthode d'estimation du temps de parcours. Pour avoir une meilleure estimation, il faut nécessairement minimiser le pourcentage de dissimilarité entre les itinéraires proposés par notre calculateur et les trajectoires empruntées par le service d'urgence.

A partir du tableau 8, on constate que 80% des itinéraires proposés par notre calculateur ont un pourcentage de similarité supérieur à 70%. On remarque aussi que lorsque le pourcentage de similarité dépasse 70%, le pourcentage d'enrichissement par la méthode directe est supérieur à 70%. Le gain au niveau du temps de parcours est en moyenne de 35 secondes. Les 20% de dissimilarité observées en moyenne sont dus à diverses sources d'erreurs telles que la précision du GPS et l'appariement. De plus, on constate que l'indice de dispersion calculé sur des vitesses moyennes déterminé par le biais des méthodes d'enrichissement directe et indirecte peut atteindre au maximum 40% et 58%. Dans la classification issue du premier arbre de décision, on constate également la présence de vitesses moyennes inattendues. Par exemple, dans la classe I4 et lorsque le nombre de voies est supérieur à 3, on constate une vitesse moyenne inférieure à celle estimée sur des routes caractérisées par trois voies. Dans la figure 80, les vitesses moyennes inattendues issues des règles de décision seront colorées en vert.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté dans un premier temps notre méthodologie pour estimer les vitesses de parcours dans le cas où l'on dispose de peu d'observations. Dans un deuxième temps, une étude de fiabilité globale de notre démarche a été réalisée.

Notre but était de chercher des comportements types des vitesses de parcours. Dans la première phase de notre méthodologie, nous avons fixé et découpé en classes les facteurs qui ont une influence sur la variation de la vitesse tels que les tranches horaires, la largeur des chaussées, le nombre, la nature et l'importance des routes. Afin de réduire la redondance entre les facteurs retenus, la méthode statistique ACM a été utilisée.

Dans la deuxième phase, et pour avoir une meilleure combinaison entre les facteurs retenus, nous avons appliqué un algorithme de classification C4.5. Deux arbres de décision ont été générés.

Concernant l'étude de la fiabilité de nos estimations des vitesses de parcours, deux méthodes ont été présentées : selon la méthode d'enrichissement et par une évaluation globale.

Après avoir achevé le processus d'estimation et la fiabilité des vitesses de parcours, nous aborderons dans le chapitre suivant un axe de recherche lié à la problématique de la recherche du plus rapide chemin. Nous étudierons les différents modes de recherche d'itinéraires afin de retenir celui qui est le plus adapté au contexte d'urgence.

Chapitre 5 Vers des modes de recherche d'itinéraires destinés aux services d'urgence

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté notre méthodologie d'estimation et d'évaluation de temps de parcours. Lors de la phase d'évaluation, et pour pouvoir comparer l'historique des trajectoires avec les itinéraires proposés par notre calculateur, nous avons utilisé l'algorithme de Dijkstra. Dans ce chapitre, nous effectuons une étude sur les différents types de graphes tels que les graphes statiques, dynamiques, par intervalles ou encore adjoints. L'un d'eux sera utilisé par notre calculateur d'itinéraires. De plus, nous nous intéressons aux différents modes de recherche d'itinéraires comme le mode monocritère et multicritères qui peuvent être statiques ou dynamiques et qui sont capables de retourner le plus ou le k plus rapide chemin. En fonction des contraintes de notre contexte opérationnel, l'un de ces modes sera retenu pour l'implémentation de notre calculateur.

5.1 La problématique de recherche du plus court chemin

La problématique de recherche d'itinéraires est généralement équivalente à la recherche d'un itinéraire dans un graphe orienté $G=(N, A)$ où N est l'ensemble des nœuds de cardinalité n et A est l'ensemble des arcs de cardinalité a .

On définit un coût C associé à chaque arc du graphe. Il représente par exemple un temps de parcours, une distance ou un coût combinant plusieurs critères.

Le plus court chemin du nœud de départ S nommé « nœud source » au nœud d'arrivée P nommé « nœud puits » sera le chemin qui minimise la somme des coûts des arcs reliant S et P .

Quel est le plus rapide chemin entre S et P (figure 87) ?

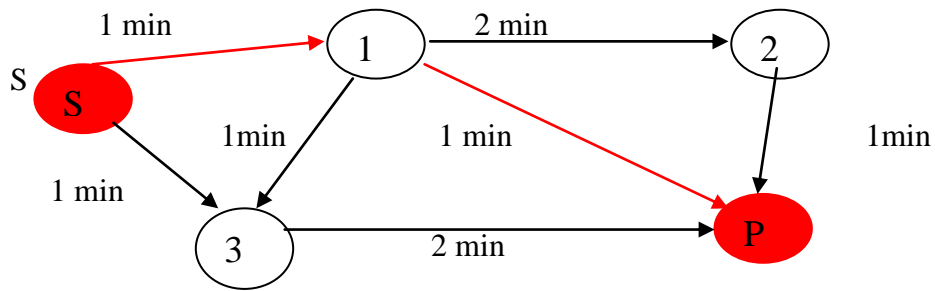


Figure 87 Exemple de plusieurs chemins dans un graphe

Trois possibilités peuvent être envisagées :

Chemin 1 : (S, 1, P) = 2 min,

Chemin 2 : (S, 3, P) = 3 min,

Chemin 3 : (S, 1, 2, P) = 4 min,

Chemin 4 : (S, 1, 3, P) = 4 min,

En conclusion, le chemin 1 sera le plus rapide.

5.2 Détermination d'un type de graphe adapté

5.2.1 Généralités sur les graphes

Un graphe peut être défini comme étant un concept mathématique pour représenter un réseau (par exemple un réseau de téléphones mobiles). Ce dernier peut avoir un fondement spatial tel qu'un réseau routier. On distingue deux types de graphes : les graphes orientés (figure 88) et les graphes non orientés (figure 89).

Soit un graphe $G(N, A)$ avec N l'ensemble des nœuds et A l'ensemble des arcs. Prenons i et j comme exemples de deux nœuds avec $\{i, j\} \in A$. Si $(i, j) \neq (j, i)$ alors le graphe est nommé orienté sinon il est nommé non orienté. Dans la suite de notre étude, on s'intéressera seulement aux graphes dits orientés.

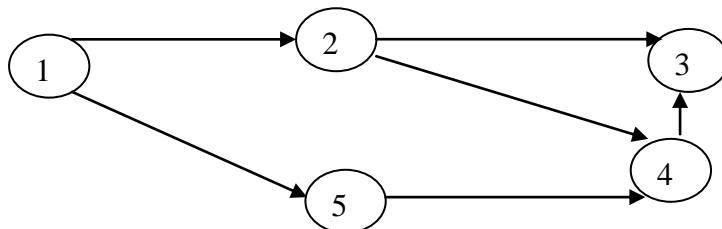


Figure 88 Exemple d'un graphe orienté

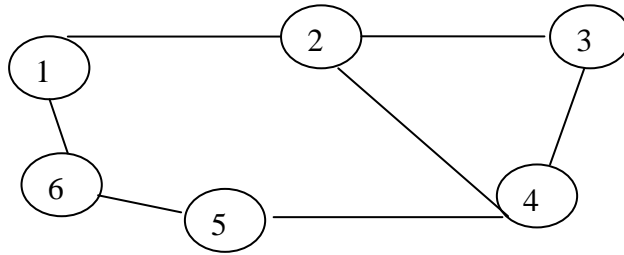


Figure 89 Exemple d'un graphe non orienté

5.2.2 Les différents types de graphes

Dans cette sous-partie, nous décrivons les différents types de graphes existant dans la littérature. Leur hiérarchie peut être présentée comme ci-dessous. Le but de cette étude est de pouvoir choisir le type de graphe le mieux adapté à notre contexte.

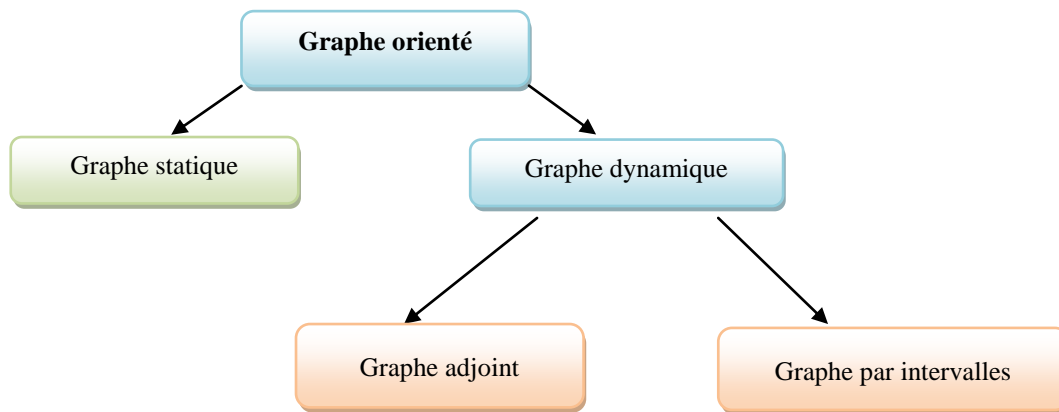


Figure 90 Hiérarchie des types de graphes orientés

Dans notre contexte, la racine de la hiérarchie des types de graphes peut être affectée au graphe dit orienté. Dans cette catégorie, deux sous-types peuvent être envisagés : les graphes statiques et dynamiques. Pour chacune de ces sous-catégories, on distingue deux autres types : les graphes adjoints et par intervalles. Dans les sections suivantes, nous décrivons en détails chaque type de graphe défini dans la hiérarchie (figure 90).

5.2.2.1 Les graphes statiques

Soit $G = (N, A)$ un graphe valué et orienté. G est de type statique lorsque les différents poids affectés aux arcs ont des valeurs constantes comme des coûts qui représentent le temps de parcours ou encore les longueurs des tronçons routiers (figure 91).

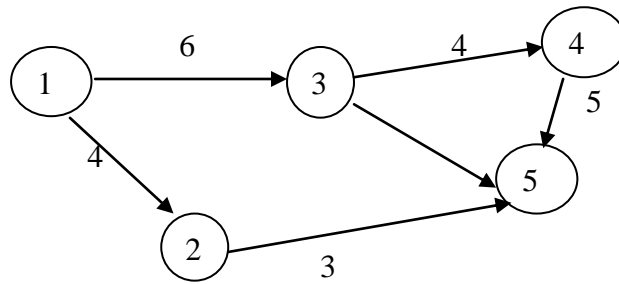


Figure 91 Exemple d'un graphe orienté statique

5.2.2.2 Les graphes dynamiques

Soit $G = (N, A)$ un graphe valué et orienté. G est de type dynamique lorsque les valeurs des différents poids affectés aux arcs varient en fonction du temps.

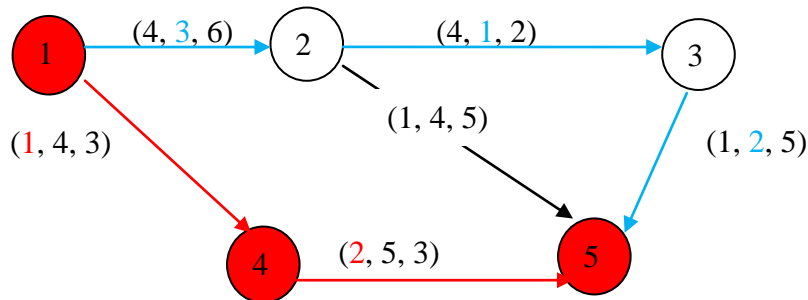


Figure 92 Exemple d'un graphe dynamique

Supposons que pour chaque arc présenté dans la figure 92, on dispose de trois temps de parcours possibles selon les tranches horaires « 7h-9h », « 11h30-14h » et « 16h30-19h ». On cherche le plus rapide chemin du nœud de départ numéro 1 vers un nœud d'arrivée numéro 5. Si on part dans la tranche horaire « 7h-9h », il faut alors emprunter l'itinéraire qui suit les nœuds 1, 4 et 5. En revanche, si on part dans la tranche horaire « 11h30-14h », l'itinéraire le plus rapide suivra les nœuds 1, 2, 3, et 5.

5.2.2.3 Les graphes avec intervalles

Soit $G = (N, A)$ un graphe valué et orienté. G est appelé graphe avec intervalles lorsque les différents poids des arcs sont présentés sous la forme d'intervalles de valeurs.

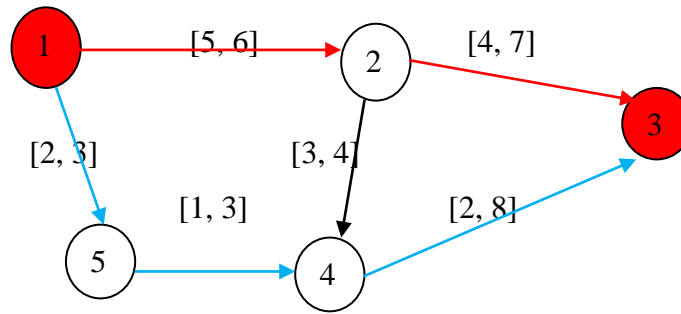


Figure 93 Exemple d'un graphe avec intervalles

Ce type de graphe pourra être utilisé dans le cas où l'on dispose d'une information sur l'incertitude des poids des arcs d'un graphe donné (Karasan, 2002). A titre d'exemple, si le coût est de 20 avec une incertitude d'au moins 20%, le coût sera alors compris dans l'intervalle [16, 24].

Prenons par exemple les intervalles des poids présentés dans la figure 93. Dans le cas où l'on est pessimiste, le chemin le plus rapide suivra les nœuds 1, 2 et 3 tracés en rouge. Dans le cas contraire, le chemin empruntera les nœuds suivants 1, 5, 4, 3 tracés en bleu. De plus, ce type de graphe pourra être étendu en graphe dynamique. Selon la tranche horaire prise en considération et pour chaque arc du graphe, on aura un coût modélisé sous forme d'un intervalle de valeur. Cependant, lors de la recherche du plus rapide chemin, il est indispensable de rendre les poids des arcs déterministes. Autrement dit, il faut fixer une et une seule valeur dans l'intervalle considéré comme poids pour chaque arc routier.

Dans cette optique, et dans le but de rejoindre un objet mobile dont l'itinéraire est connu, (Hizem., 2008) introduit la notion du degré d'optimisme. L'objectif du degré d'optimisme est de rendre le poids d'un arc routier à un instant donné déterministe. Pour cela, l'auteur définit la fonction suivante :

$$P(i, j, t) = a_{ij}^t + (b_{ij}^t - a_{ij}^t)\alpha$$

a_{ij}^t et b_{ij}^t représentent respectivement la borne inférieure et supérieure de l'intervalle de coût sur l'arc routier délimité par les nœuds i et j à un instant donné t . α est une constante qui reflète les désirs des décideurs. Ainsi, si on est optimiste, $\alpha = 1$ et par conséquent $P(i, j, t) = b_{ij}^t$. Sinon, si on est pessimiste, $\alpha = 0$ et $P(i, j, t) = a_{ij}^t$. Par ailleurs, pour plus de pertinence, l'auteur propose d'étendre le degré d'optimisme d'une constante vers une fonction $\alpha(i, j, t)$ qui dépend de deux paramètres : le temps et la nature de l'arc. De plus, le calcul du plus court chemin sera en ligne. L'auteur définit la fonction $\alpha(i, j, t)$ à l'aide de quatre paramètres : α_{profil} pour modéliser les désirs des décideurs et les fonctions $\beta(i, j, t)$, $\gamma(i, j, t)$ et $\delta(i, j, t)$ ayant pour rôle de corriger le paramètre α_{profil} . Nous présentons ci-dessous les détails de chaque paramètre.

- α_{profil} est un paramètre constant qui représente les préférences des utilisateurs. Il peut être optimiste ou pessimiste lors de la recherche d'itinéraire.

- $\beta(i, j, t)$ est une fonction qui modélise l'influence de la nature de l'arc (i, j) sur le facteur d'optimisme. A titre d'exemple, sur un arc routier qui présente un grand risque de congestion comme les routes de nature tunnels ou ponts, il faut être pessimiste. La fonction $\beta(i, j, t)$ dépend de la position de l'arc (i, j) par rapport à la position du véhicule. Pour plus de pertinence, l'auteur propose d'adapter la fonction pour qu'elle puisse tenir compte de l'horizon lors du déplacement du véhicule. L'horizon de l'emplacement du véhicule est défini comme étant un sous-ensemble d'arcs routiers de mêmes caractéristiques spatiales ou temporelles (temps de parcours pour traverser les arcs routiers).

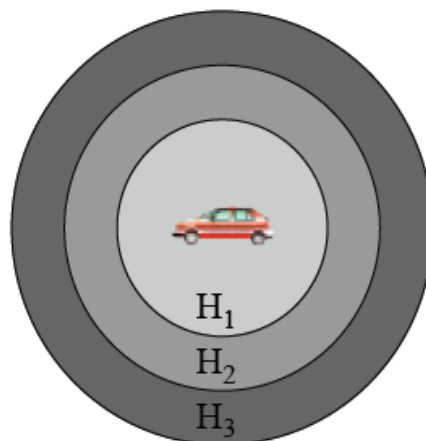


Figure 94 Exemple de la notion d'horizon (Hizem., 2008)

Dans un cas d'étude, l'auteur propose trois catégories d'horizons pour un emplacement d'un véhicule. Elles sont présentées comme suit (figure 94) :

H1 « est un ensemble d'arcs routiers pour lequel la durée pour arriver à un arc (i, j) à partir de la position du véhicule est inférieure à 5 unités de temps ».

H2 « est un ensemble d'arcs routiers pour lequel la durée pour arriver à un arc (i, j) à partir de la position du véhicule est inférieure à 10 unités de temps ».

H3 « est un ensemble d'arcs routiers pour lequel la durée pour arriver à un arc (i, j) à partir de la position du véhicule est inférieure à 15 unité de temps ».

Selon le type de l'horizon, l'auteur fixe la valeur de $\beta(i, j, t)$. Le principe adopté est le suivant : plus l'arc routier est situé dans un horizon lointain, plus la fonction $\beta(i, j, t)$ influe d'une manière

pessimiste sur le degré d'optimisme. Dans un exemple de calcul, l'auteur définit $\beta(i, j, t)$ comme suit :

$$\beta(i, j, t) = \begin{cases} 100\% & \text{si } (i, j) \in H1 \text{ à l'instant } t \\ 110\% & \text{si } (i, j) \in H2 \text{ à l'instant } t \\ 120\% & \text{si } (i, j) \in H3 \text{ à l'instant } t \end{cases}$$

- $\gamma(i, j, t)$: est une fonction qui permet la correction des erreurs d'estimation réalisées auparavant.

Elle est définie de manière récursive de la façon suivante :

$$\gamma(i, j, t) = \begin{cases} 100\% & \text{si } t = 0 \\ \gamma(i, j, t-1) \times \left(1 + \left(\frac{p_{eff}(i, j, t-1) - p_{est}(i, j, t-1)}{b^{t-1}_{ij} - a^{t-1}_{ij}}\right)\right) & \text{Sinon} \end{cases}$$

Avec $\gamma(i, j, t-1)$ le poids estimé sur l'arc (i, j) à l'instant t-1, $p_{eff}(i, j, t-1)$ le poids effectif de l'arc (i, j) à l'instant t-1 et $p_{est}(i, j, t-1)$ l'erreur estimée sur l'arc (i, j) à l'instant t-1.

- $\delta(i, j, t)$: est une fonction qui permet d'intégrer les phénomènes externes ayant une influence sur le degré d'optimisme, comme les conditions météorologiques telles que la neige ou encore la pluie.

L'auteur cite un exemple où il affecte des valeurs à la fonction $\delta(i, j, t)$ en pourcentage et selon la condition météorologique :

$$\delta(i, j, t) = \begin{cases} 100\% & \text{si beau temps} \\ 110\% & \text{si pluie} \\ 120\% & \text{si neige} \end{cases}$$

Après avoir présenté les différents paramètres qui peuvent influencer sur le degré d'optimisme $\alpha(i, j, t)$, le problème de leurs agrégations se pose. Deux techniques ont donc été proposées : par somme pondérée et par l'intégrale de Choquet. On présente la première technique comme suit :

$$\alpha(i, j, t) = \min(1, \alpha_{profil} \times (w1 \times \beta(i, j, t) + w2 \times \gamma(i, j, t) + w3 \times \delta(i, j, t)))$$

Les poids w_1 , w_2 et w_3 varient selon l'importance de chaque paramètre tout en respectant la condition $w_1 + w_2 + w_3 = 1$.

5.2.2.4 Les graphes adjoints

Dans la problématique de recherche du plus rapide chemin, il est intéressant de modéliser le temps d'arrêt moyen sur les carrefours ou les lieux d'intersections. Ce type de modélisation pourrait directement influencer sur le choix d'itinéraire. Du point de vue théorique, ce type de temps peut être modélisé au niveau des nœuds. Or, aucun des types de graphes présentés n'offre cette possibilité. Afin de résoudre ce problème, de nouveaux types de graphes, nommés graphes adjoints, sont apparus. Le but de ce type de graphe est de modéliser les coûts sur les enchaînements des arcs. Initialement, les graphes adjoints ont été présentés dans (Whitney, 1932). Le principe de la transformation d'un graphe initial G vers un graphe dit adjoint G_A suit deux étapes.

- 1) Chaque arc du graphe initial devient un nœud dans le graphe adjoint.
- 2) Pour chaque enchaînement possible entre deux arcs du graphe initial G , un arc est créé dans le graphe adjoint G_A .

Dans le but d'expliquer davantage ces deux étapes, nous utilisons directement un exemple présenté dans (Sauvanet, 2011).

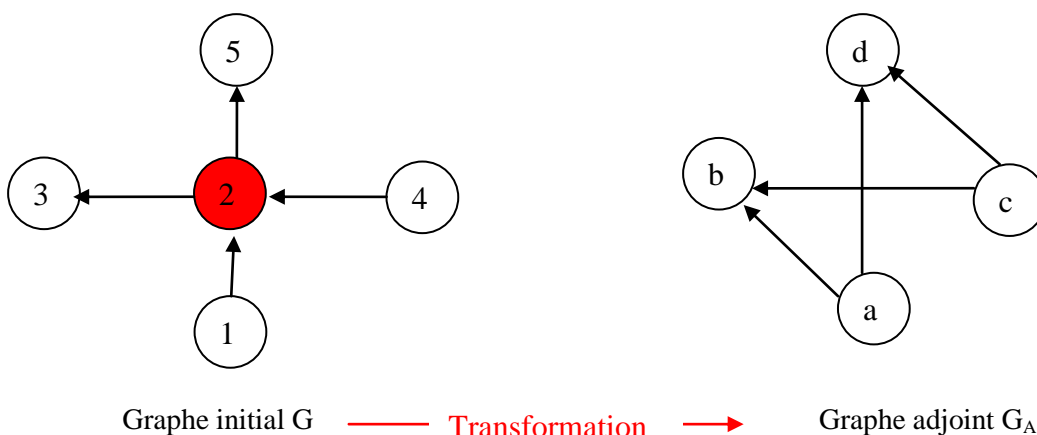


Figure 95 Transformation d'un graphe initial vers un graphe adjoint

Dans la figure 95, on présente un graphe initial à gauche et sa transformation en graphe adjoint à droite.

Dans le graphe initial, les arcs (1, 2) et (2, 5) seront respectivement représentés dans le graphe adjoint par les nœuds (a) et (b). De plus, pour les coûts des arcs (1, 2) et (2, 5) du graphe initial, ils seront additionnés et affectés sur l'arc du graphe adjoint qui relie les nœuds (a) et (b). Imaginons maintenant que le nœud numéro 2 du graphe initial représente dans le monde réel un feu tricolore. Pour pouvoir

modéliser le temps d'arrêts moyen sur ce feu, il suffit d'ajouter un deuxième critère de coûts qui représente le temps d'arrêts moyen. Par conséquent, le problème de recherche du plus court chemin se complique et se transforme d'une minimisation de coûts selon un seul critère vers une minimisation de deux coûts de deux facteurs. De plus, cette complexité peut augmenter dans le cas où les deux coûts varient en fonction du temps.

5.2.3 Choix du type de graphe et implémentation

5.2.3.1 Discussion et choix du type de graphe

Dans les sections précédentes, nous avons présenté deux catégories de types de graphe : par intervalle et adjoint qui peuvent être statiques ou encore dépendants du temps. Vu la stratégie adoptée dans notre processus d'estimation du temps de parcours, il s'avère que le type de graphe par intervalle dépendant du temps est le plus adapté à notre contexte. En effet, pour chaque tronçon routier et selon les tranches horaires retenues, on aura un intervalle de temps de parcours. Pour pouvoir rendre le poids d'un arc déterministe (choix d'une valeur dans l'intervalle du temps de parcours), la notion de degré d'optimisme présenté dans (Hizem., 2008) sera retenue. Seul le paramètre lié aux conditions météorologiques est pris en considération et ceci sera réalisé en temps réel. On précise qu'il n'est pas nécessaire d'intégrer les autres paramètres dans la création de la fonction du degré d'optimisme puisqu'ils sont déjà pris en compte lors de l'estimation du temps de parcours. Dans notre contexte, le poids d'un arc routier sera exprimé en fonction du degré d'optimisme δ comme suit :

$$P(i, j, t) = \frac{\text{longueur}(i, j)}{(a_{ij}^t + (b_{ij}^t - a_{ij}^t) \times \delta)}$$

Où la longueur (i, j) est en mètres, a_{ij}^t et b_{ij}^t sont en mètres / secondes et $P(i, j, t)$ est en secondes.

On précise que le degré d'optimisme δ varie selon les conditions météorologiques. a_{ij}^t représente la borne inférieure de l'intervalle de la vitesse observée sur un arc (i, j) dans une tranche horaire qui sera la vitesse moyenne moins l'écart type. b_{ij}^t désigne la borne supérieure qui sera la vitesse moyenne plus l'écart type.

Dans le prochain chapitre, nous décrirons en détail l'adaptation de la notion de degré d'optimisme à notre contexte.

L'idée de transformer le graphe par intervalles dépendant du temps en graphe adjoint est exclue. Cela est justifié par l'étude d'impact des feux tricolores sur la variation des vitesses observées sur les trajectoires des interventions. Nous précisons que cette transformation pourrait être nécessaire dans d'autres zones d'études et dans d'autres contextes.

5.2.3.2 Choix de la bibliothèque pour l'implémentation

La recherche bibliographique a montré qu'il existe plusieurs bibliothèques pour la modélisation et l'implémentation des graphes. On cite à titre d'exemples les bibliothèques open-sources suivantes : BGL³ (Boost Graph Library), Jung⁴ (the java Universal Network Graph) et JgraphT⁵ (Java Graph Library Topology).

Dans la bibliothèque BGL, les algorithmes sont implémentés en langage de programmation C++. La bibliothèque propose des classes de graphes génériques et plusieurs implémentations d'algorithmes de recherche du plus court chemin comme l'algorithme de Dijkstra et Bellman Ford. Elle a été utilisée dans diverses applications telles que dans la recherche d'un itinéraire dans un contexte multimodal (Bousquet., 2010). L'auteur de ce travail n'a pas fourni des éléments sur la performance des structures de données sous-jacentes et sa facilité d'utilisation.

JUNG (the Java Universal Network/Graph Framework) est une bibliothèque pour la modélisation, la manipulation et la visualisation des graphes. Elle offre la possibilité de manipuler plusieurs types d'objets (arcs et nœuds) associés aux différents types de graphes comme les graphes orientés ou non, les graphes multi-modaux et enfin les hyper-graphes. De plus, la bibliothèque implémente plusieurs algorithmes de recherche d'itinéraires et de calcul de distance sur le graphe.

La bibliothèque JUNG a été référencée dans de nombreux travaux de recherche tel que dans (Danyel et al., 2004) pour l'analyse et l'affichage des graphes ou encore dans l'analyse des réseaux sociaux (Danyel., 2003).

JGraphT (Java Graph Library Topology) est une bibliothèque qui ressemble beaucoup à JUNG.

La bibliothèque offre la possibilité d'implémenter plusieurs types de graphes : orientés ou non, multigraphes ou pseudographes. Elle propose aussi une implémentation des algorithmes de recherche d'itinéraire tel que le k-plus court chemin.

La bibliothèque a été utilisée dans divers travaux de recherche tels que (Mermet, 2011) pour l'aide à l'exploration des propriétés structurelles du réseau routier ou encore (Michaud., 2006) pour l'implémentation d'un plugin de recherche du plus court chemin dans le SIG open source JUMP.

(Mermet., 2011) propose une étude comparative entre les deux bibliothèques JUNG et JgraphT. En se basant sur leurs documentations techniques, l'auteur dresse l'architecture de chacune. Dans sa comparaison, l'auteur s'intéresse à deux aspects : la performance au niveau de la visualisation et les structures de données sous-jacentes pour la construction des graphes.

³ <http://www.boost.org/>

⁴ <http://jung.sourceforge.net/index.html>

⁵ <http://www.jgraphT.org/>

L'auteur montre que la bibliothèque JUNG est plus performante au niveau de la visualisation. Cependant, la bibliothèque JgraphT est meilleure au niveau du temps d'accès aux différents éléments du graphe puisque leur stockage est réalisé sous forme de tables de hachage.

Dans notre contexte, nous sommes concernés par l'optimisation du temps d'accès aux différents éléments du graphe. Ceci peut directement influencer sur le temps du calcul d'itinéraires. De plus, la performance au niveau de la visualisation n'est pas intéressante dans notre projet. C'est pour ces raisons que la bibliothèque JgraphT est retenue pour la construction des graphes du réseau routier.

5.3 Discussions et choix du mode de recherche d'itinéraires appropriés

Dans cette section, nous présentons les différents modes de recherche du plus court chemin dont l'un sera retenu pour l'implémentation de notre calculateur d'itinéraires. La hiérarchie de ces modes est présentée dans la figure 96 :

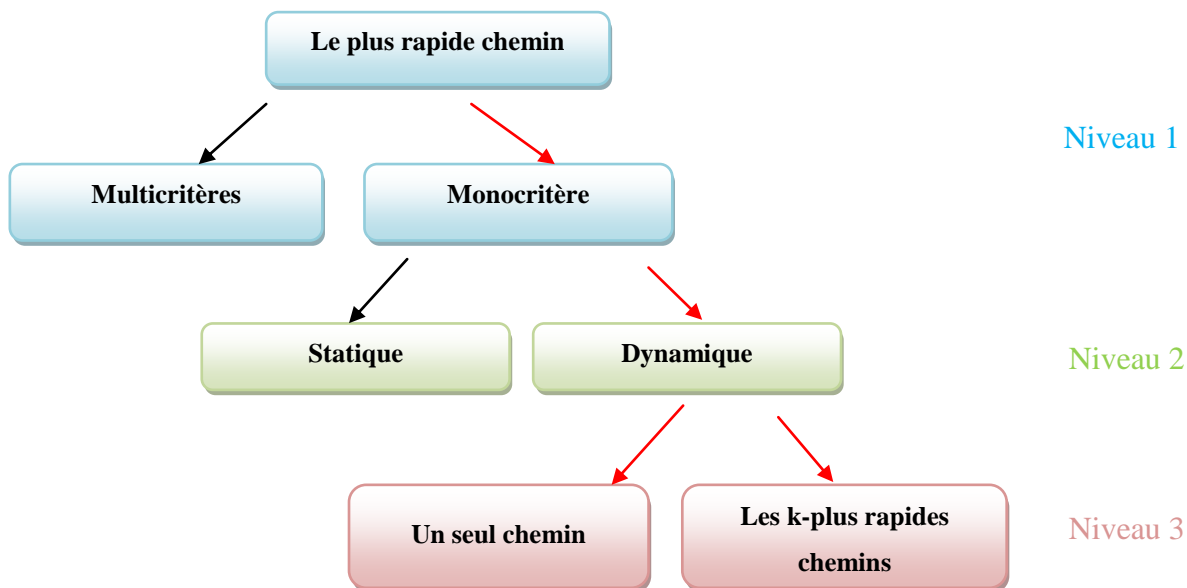


Figure 96 Hiérarchie des modes de recherche du plus court chemin

Dans la suite, et pour la présentation des différents modes de recherche du plus court chemin, nous suivrons l'ordre des niveaux présentés dans la figure 96. Nous décrirons une revue de la littérature pour chaque niveau ainsi que nos choix.

Niveau 1 :

Dans le niveau 1, nous présentons deux modes de recherche du plus court chemin : le mode monocritère et le mode multicritères.

Le mode de recherche du plus court chemin monocritère peut être défini comme étant la recherche d'un itinéraire qui minimise le coût des poids d'un seul critère. Il pourrait être un temps de parcours, une distance ou encore un coût de déplacement.

En réalité, la recherche du plus court chemin en se basant sur un seul critère n'est pas toujours suffisante pour différents modes de déplacement. Prenons par exemple le cas où l'on cherche le meilleur itinéraire à emprunter par un cycliste (Sauvanet, 2011). Plusieurs critères peuvent être pris en considération tels que la distance totale du chemin, l'effort fourni par le cycliste et la linéarité du chemin. On parle ainsi du problème de recherche d'itinéraire multiobjectifs. Le grand défi est de trouver le meilleur compromis entre ces objectifs. Afin d'illustrer cette problématique, nous reprenons celle étudiée par (Sauvanet, 2011). L'auteur est en quête du meilleur itinéraire pour un cycliste. Parmi les critères étudiés, la distance et la sécurité sont retenues dans cet exemple.

L'idée de base de l'auteur est d'affecter deux coûts à chaque arc routier. Soient C^1 et C^2 qui représentent respectivement la longueur et l'insécurité d'un arc routier. Notons par $\{A\}$ l'ensemble des solutions ou les itinéraires retournés pour un point de départ et d'arrivée bien définis. Il est possible de représenter cet ensemble $\{A\}$ sur un repère où les axes des abscisses et des ordonnées correspondent respectivement à l'insécurité et à la distance des itinéraires.

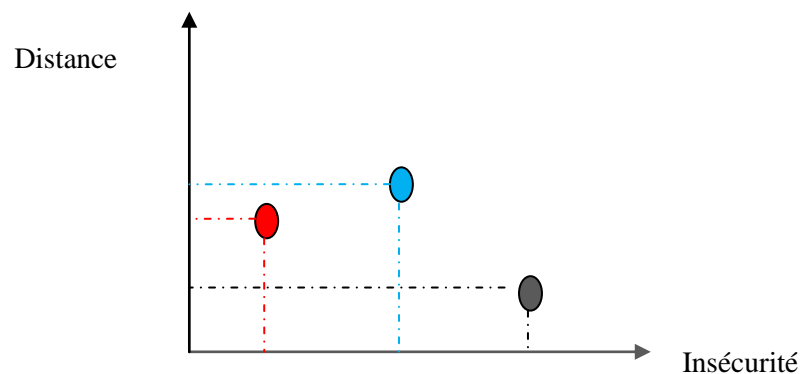


Figure 97 Représentations des solutions $\{A\}$ dans l'espace de la distance et de l'insécurité

On a présenté trois solutions dans la figure 97. On constate que la solution colorée en rouge est la meilleure du point de vue de l'insécurité, tandis que celle colorée en noire est la meilleure du point de vue de la distance. Afin de retenir un seul itinéraire, l'approche peut être « à priori » utilisée. Elle consiste à prendre en considération les préférences des décideurs. Ceci peut être techniquement traduit par l'affectation d'un vecteur de poids à chaque critère étudié. Il est donc possible d'utiliser un algorithme de recherche d'itinéraires multicritères (Martins., 1984).

En ce qui concerne le contexte d'urgence, le critère lié au temps de parcours est le seul facteur à optimiser. Le meilleur itinéraire sera celui qui minimise le temps de parcours. Dans la suite de notre étude, le mode multicritères sera exclu.

Niveau 2 :

Pour résoudre la problématique de recherche du plus court chemin en mode statique, plusieurs algorithmes peuvent être appliqués. On cite à titre d'exemples les algorithmes de Dijkstra et Bellman Ford.

L'algorithme de Dijkstra permet le calcul du plus court chemin d'un nœud de départ vers plusieurs nœuds de destinations d'un graphe. Il ne fonctionne que sur des graphes valués avec des coûts positifs ou nuls. L'algorithme est de type « Labelling » puisqu'un « label » (distance [U]) est associé à chaque nœud $U \in Q$ et contient la valeur du poids minimal correspondant au plus court chemin entre le nœud source et le nœud U. A l'initialisation de l'algorithme, tous les « Labels » sont initialisés à $+\infty$ sauf le « label » du nœud source qui prend la valeur 0. Ensuite et en partant du nœud source, le concept de l'algorithme consiste à retirer le nœud ayant le plus petit « label » avant de mettre à jour les « labels » des nœuds successeurs s'il ya une amélioration (dans le pseudo-code de l'algorithme présenté dans la figure 98, ce traitement est coloré en rouge).

L'algorithme de Dijkstra est de type « label setting » puisqu'à chaque itération, un nœud est définitivement retiré de la file Q et son poids est définitivement fixé. La complexité de cet algorithme est en $O(n^2)$.

Comme l'algorithme de Dijkstra, l'algorithme de Bellman Ford permet le calcul du plus court chemin d'un nœud vers tous les autres nœuds du graphe. Le principe de l'algorithme est d'examiner à chaque itération tous les arcs sans se limiter à ceux qui sont adjacents au nœud le plus prometteur.

Contrairement à l'algorithme Dijkstra, l'algorithme de Bellman Ford est de type « label correcting » puisqu'à chaque itération, le plus court chemin amenant à un nœud peut être modifié. L'avantage majeur de cet algorithme réside dans la possibilité de détecter des cycles absorbants étant donné que l'algorithme peut fonctionner sur des arcs de coûts négatifs. Un cycle absorbant est défini comme étant une boucle avec un poids total négatif. Ceci est réalisé dans l'algorithme par la dernière boucle colorée en rouge (figure 99). La complexité de cet algorithme est en $O(n^2)$.

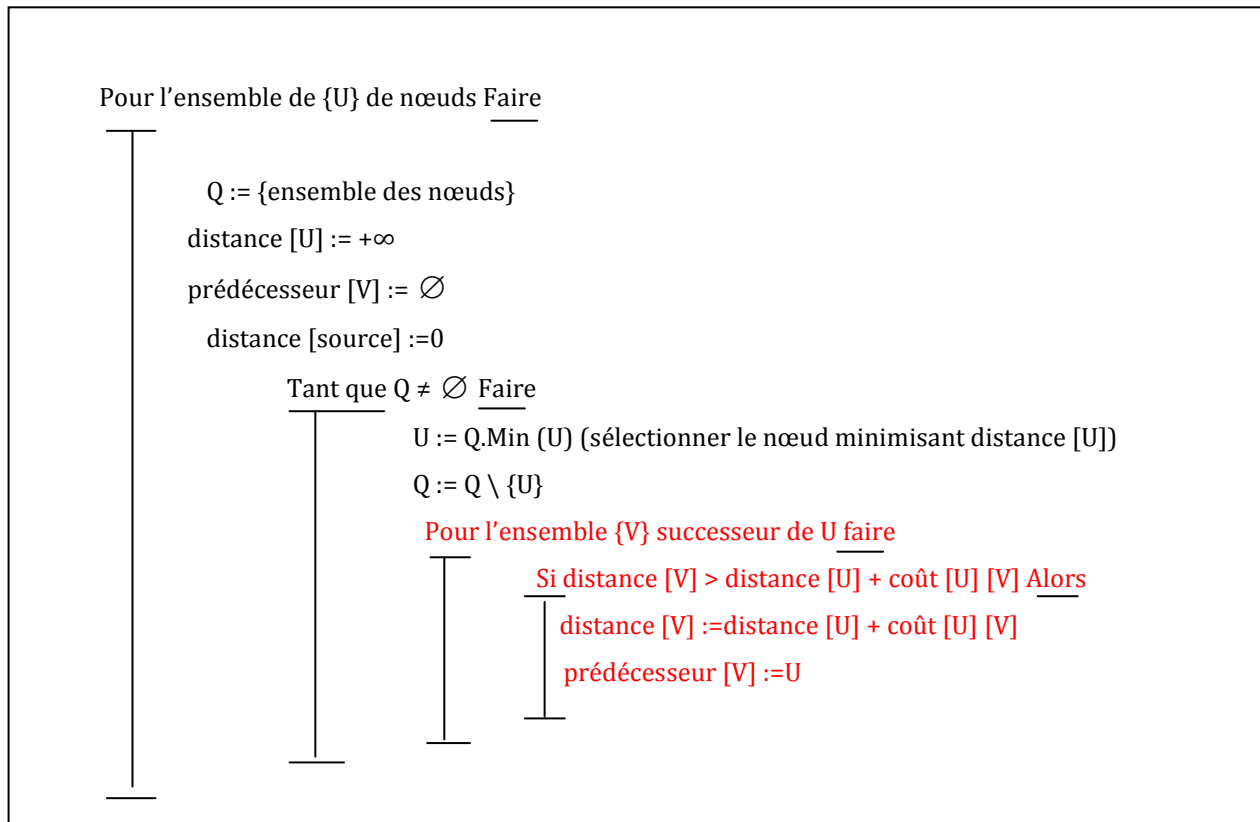


Figure 98 Algorithme de Dijkstra d'après (Grabener, 2010)

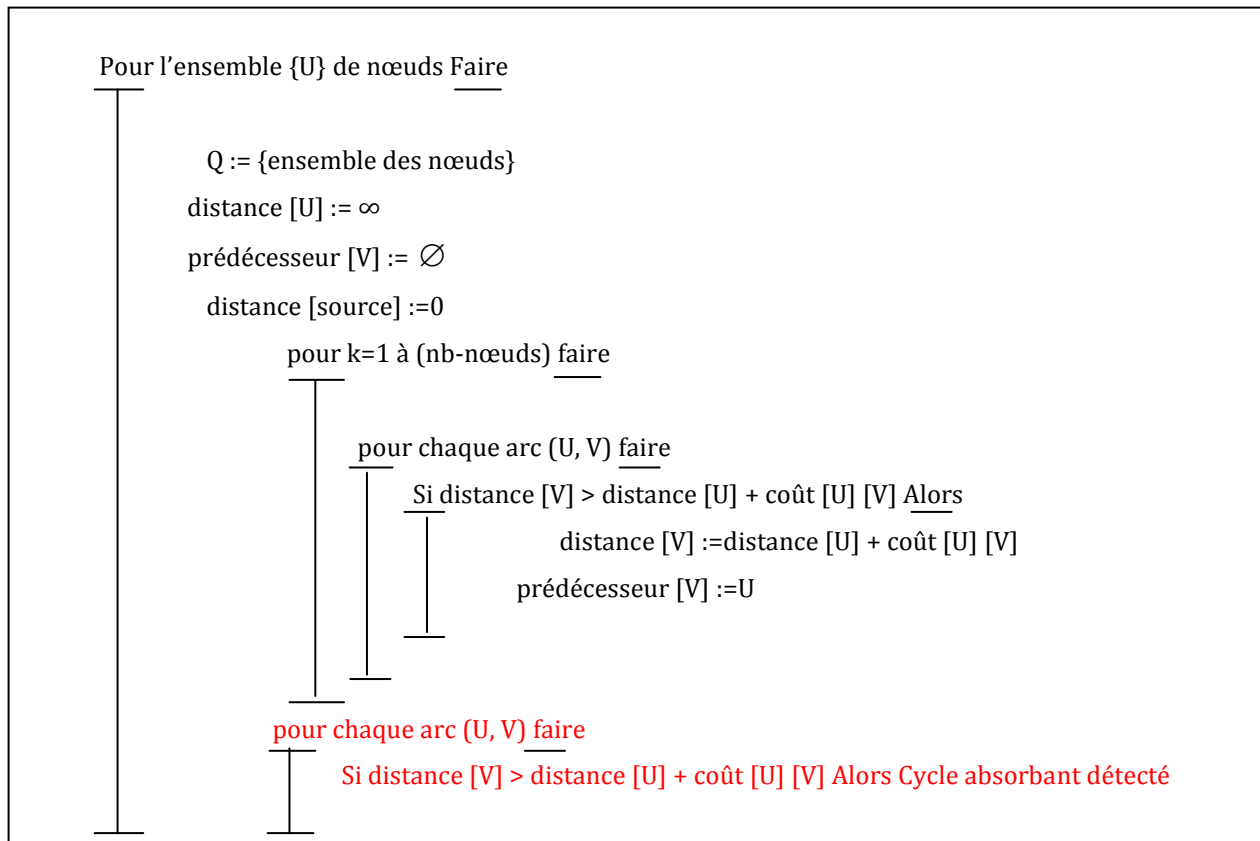


Figure 99 Algorithme de Bellman Ford d'après (Grabener, 2010)

Dans notre contexte, les estimations de temps de parcours sont influencées par des facteurs temporels (les tranches horaires retenues). Pour cela, il est nécessaire que l'algorithme de recherche du plus rapide chemin tienne compte de la variation temporelle du temps de parcours. On prend uniquement en considération le changement temporel de l'heure de départ.

Pour pouvoir tenir compte de la variation des estimations de temps de parcours dans le temps, (Dreyfus., 1969) précise que l'algorithme de Dijkstra à peine modifié peut être utilisé. Il sera nommé Dijkstra généralisé. Son détail est présenté comme suit.

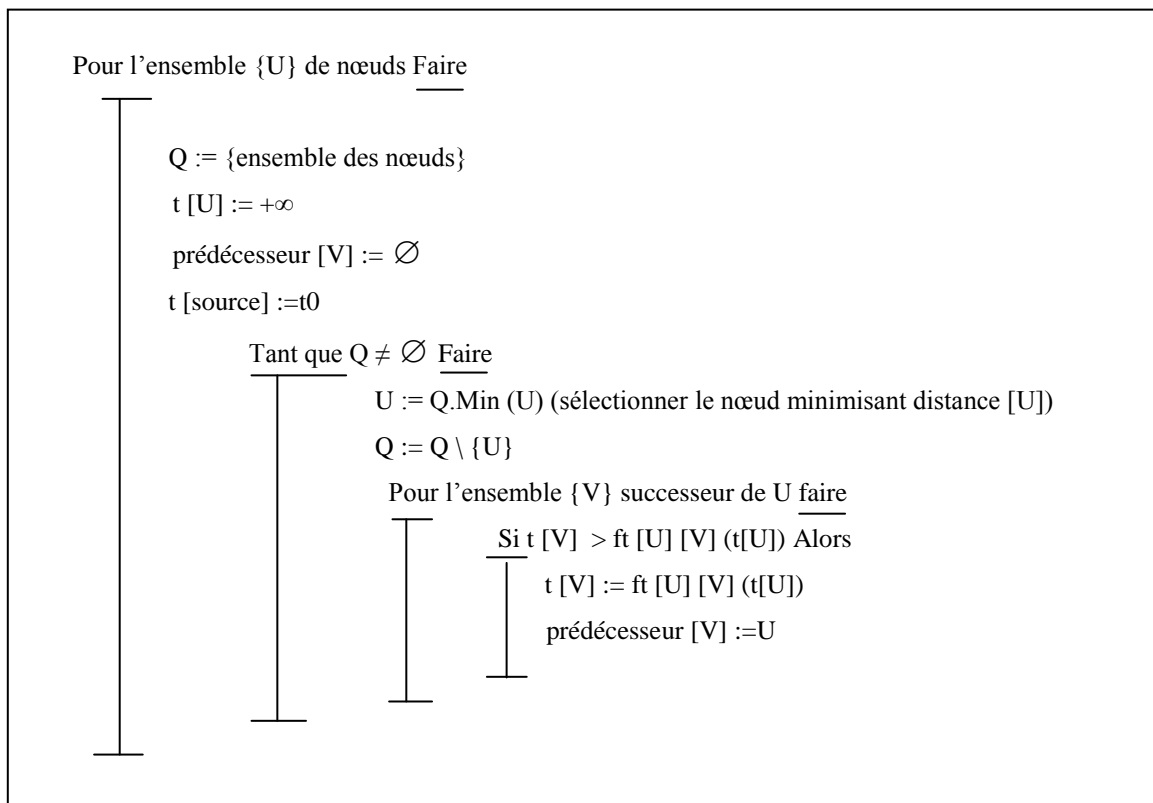


Figure 100 Algorithme de Dijkstra généralisé d'après (Grabener, 2010)

Dans l'algorithme, $t [U]$ représente le temps enregistré lors du départ du nœud U . $ft [U] [V] (t[U])$ est une fonction qui reçoit comme paramètre d'entrée l'arc de déplacement (du nœud U vers V) et le temps enregistré lors du départ du nœud U . (Gondran et al., 2002) précisent que pour que cet algorithme soit optimal, la fonction $f(t)$ doit être croissante et tend vers l'infini lorsque le temps tend vers l'infini.

Généralement, la fonction qui représente le coût d'un arc et qui varie en fonction du temps prend la forme suivante : $f(t) = t + A(t)$, où $A(t)$ représente le coût d'un arc et est en fonction du temps et « t » désigne le temps enregistré à un moment donné. La fonction $f(t)$ étant croissante et tendant vers l'infini lorsque le temps tend vers l'infini, il est possible dans ce cas d'utiliser l'algorithme de Dijkstra généralisé. Par analogie, si les coûts accordés aux arcs d'un graphe donné sont positifs, il est possible

d'étendre l'algorithme de Bellman Ford en mode dynamique. On pourra le nommer Bellman Ford généralisé. De plus, il est possible de supprimer les lignes des codes permettant la détection des cycles absorbants. Le détail de l'algorithme est présenté dans la figure 101.

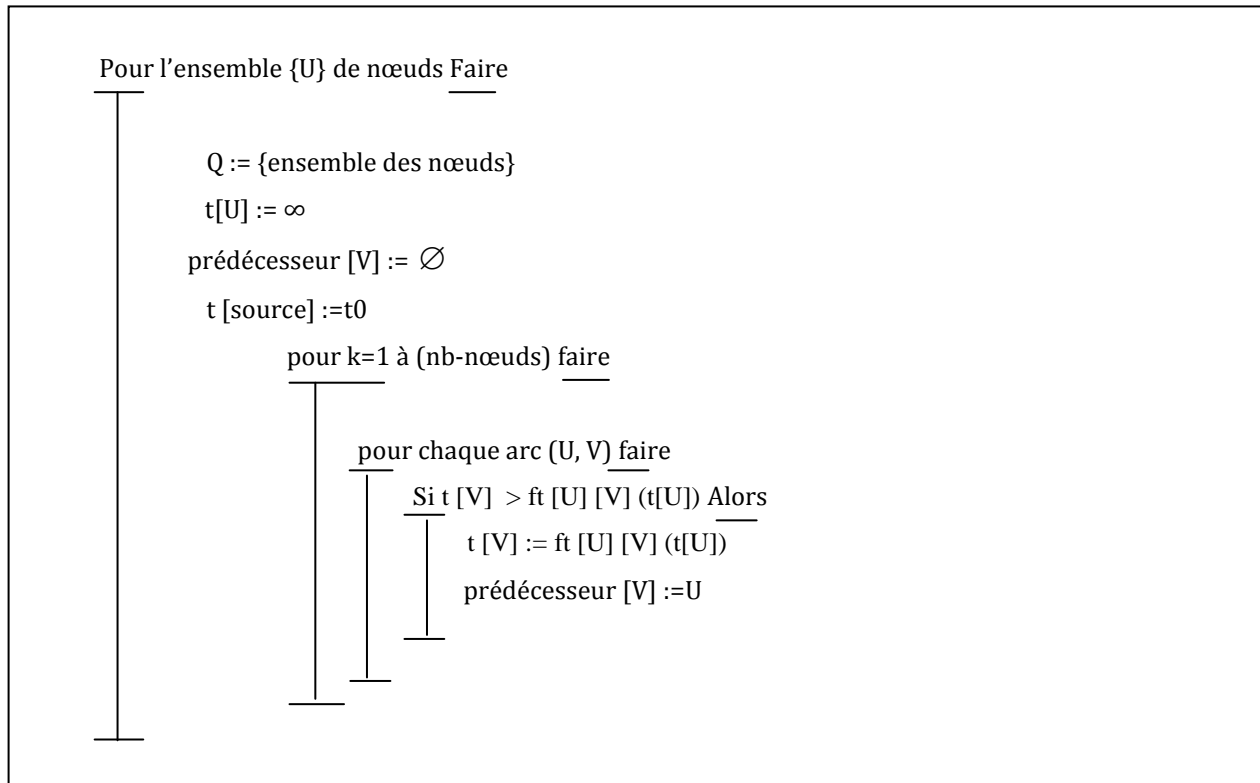


Figure 101 Algorithme de Bellman Ford étendu en mode dynamique

Dans le cas où la fonction de coût sur un arc dépend du temps, il n'est pas possible d'utiliser l'algorithme de Dijkstra généralisé. Afin d'expliquer cette contrainte, on présente un exemple présenté dans (Orda et al., 1991).

Supposons qu'on a les coûts suivants sur une portion du graphe (figure 102).

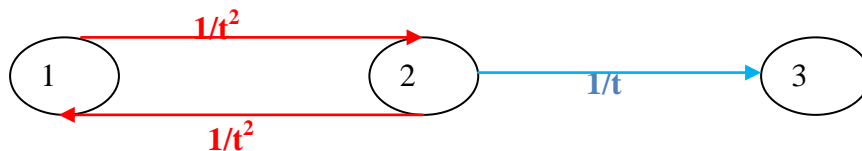


Figure 102 Le plus court chemin avec un coût de longueur infinie

Les fonctions des coûts seront modélisées par des fonctions décroissantes et qui dépendent du temps. Pour chercher l'itinéraire du plus court chemin du nœud 1 au nœud 2, l'algorithme bouclera infiniment entre les deux nœuds. Le coût optimal du chemin sera donc :

$$\sum_{t=1}^{t=+\infty} \frac{1}{t^2} = \frac{\pi}{6}.$$

Or dans notre contexte, les coûts varient selon les tranches horaires retenues. Les temps de parcours sur un arc seront exprimés par une fonction dite constante par morceaux. Cette fonction est présentée comme ci- après.

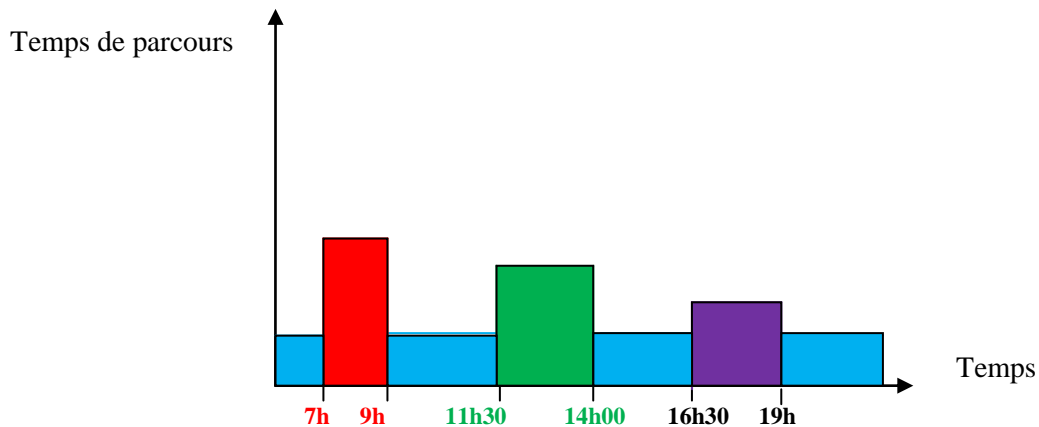


Figure 103 Exemple de variation du temps de parcours sur un arc routier

Avec cette représentation du temps de parcours (figure 103), la fonction de coût sur chaque arc sera croissante et tend vers l'infini lorsque le temps tend vers l'infini. Par conséquent, l'optimalité de l'algorithme est garantie. L'algorithme Dijkstra généralisé a été retenu pour la première version de notre moteur de recherche d'itinéraires. Il a été développé sous le langage de programmation java et a été testé sur une machine - Intel Core i5 2,27GHz + RAM 4Go. Le temps de réponse est de l'ordre de quelques millisecondes.

Niveau 3 :

La première version de notre moteur de recherche d'itinéraire était basée sur un seul facteur qui est le temps de parcours et en mode dynamique selon les tranches horaires retenues. Cependant, nous estimons que dans un contexte d'urgence prévoir un seul itinéraire pour une intervention n'est pas suffisant. Supposons que deux équipes d'urgences partent pour une même intervention, proposer pour chacune un itinéraire différent pourra minimiser le risque de blocage.

Pour cette raison, dans le niveau trois de la hiérarchie des modes de recherche d'itinéraires, nous nous orientons vers le mode des k-plus rapides chemins.

En effet, ce mode consiste à chercher les k plus rapides chemins où k est un entier positif. Autrement dit, on cherche le premier, le deuxième jusqu'aux k-plus rapides chemins pour un point de départ et d'arrivée connus.

De même que dans le mode de recherche d'un seul itinéraire, les algorithmes des k plus rapides chemins peuvent être regroupés en deux catégories : les algorithmes de types « label setting » et « label correcting ». Pour chaque catégorie, on distingue aussi deux modes : statique ou dynamique.

Dans la littérature, et pour les algorithmes de types « label setting » et en mode statique, le plus utilisé est présenté dans (Yen., 1971). Le détail de l'algorithme est présenté ci-après (figure 104).

```

Itineraire := Dijkstra (A, B) ** Calculer le plus rapide chemin entre A et B # étendre en mode
dynamique (Dijkstra généralisé)
Itineraire := Bellman Ford (A, B)
# (Version de Bellman Ford étendu en mode dynamique)
Itineraire := Bellman Ford étendu (A, B)
Itineraire_candidat := {Itineraire} # ensemble des itinéraires candidats
Itineraire_courant := {  $\phi$  } # ensemble des itinéraires en cours
Pour i de 1 à k faire (avec k un entier positif qui reflète le nombre d'itinéraire à calculer)
    I := l'itinéraire le plus rapide dans Itineraire_candidat
    Nœud_deviation := déterminer le nœud de déviation entre I et tous les itinéraires de
    Itineraire_courant
    Itineraire_courant := Itineraire_courant  $\cup$  {I}
    Tant que Nœud_deviation  $\neq$  B faire
        Supprimer les arcs et les nœuds de I depuis le point de départ A
        jusqu'au le nœud de déviation { Nœud_deviation }
         $\forall_n \in N$  {ensemble des nœuds}, supprimer les arcs  $a_{A, s}$  si  $\exists$  un
        itineraire  $\in$  {Itineraire_courant} tel que  $a_{A, s} \in$  {Itineraire_courant}
        I' := Dijkstra (Nœud_deviation, B) # étendre en mode dynamique
        I' := Dijkstra (Nœud_deviation, B) # étendre en mode dynamique
        I' := Bellman Ford (Nœud_deviation, B)
        # (Version de Bellman Ford étendu en mode dynamique)
        I' := Bellman Ford étendu (Nœud_deviation, B)
        I' := concatener (I, I')
        Itineraire_candidat := Itineraire_candidat  $\cup$  {I'}
        Restaurer le graphe # mettre à l'état initial le graphe
        Nœud_deviation := successeur (Nœud_deviation, I)

```

Figure 104 Algorithme des k plus rapides chemins d'après (Yen, 1971)

Le principe de l'algorithme se base sur la notion de déviation d'itinéraire. L'idée est de chercher le nœud à partir duquel l'itinéraire le plus rapide est différent de tous les itinéraires enregistrés dans $\{\text{Itineraire}_{\text{courant}}\}$.

Pour illustrer la façon de déterminer un nœud de déviation entre un itinéraire I et un ensemble d'itinéraires $\{I_2, I_3, \dots\}$, on présente l'exemple du sous-graphe suivant (figure 105):

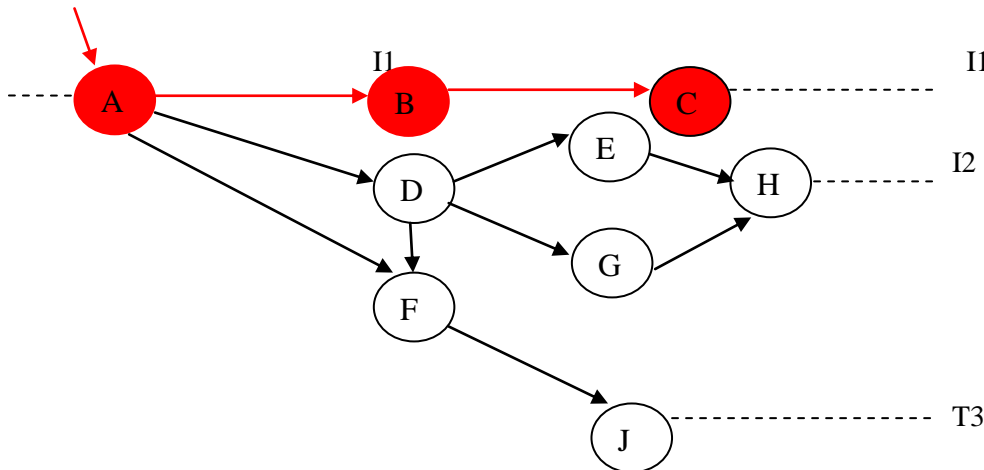


Figure 105 Déviation d'un itinéraire par rapport à un ensemble d'itinéraires

Le nœud de déviation d'un itinéraire I1 par rapport à l'ensemble des itinéraires $\{I_2, I_3\}$ sera le nœud A.

Dans un premier temps, l'algorithme de (Yen, 1971) commence par la détermination du plus rapide chemin entre un point de départ et un point d'arrivée. Dans un deuxième temps et pour chaque itération, on détermine le nœud de déviation entre l'itinéraire le plus rapide et l'ensemble des itinéraires courants $\{\text{Itineraire}_{\text{courant}}\}$. De plus, on supprime les arcs partant du nœud source jusqu'au nœud de déviation. Ensuite, on calcule le plus rapide chemin entre le nœud de déviation et le point d'arrivée $\{I\}$. Enfin, on concatène le chemin le plus rapide depuis le nœud de déviation jusqu'au nœud d'arrivée avec le chemin depuis le nœud de départ vers le nœud de déviation.

Par analogie avec l'algorithme de Dijkstra généralisé, l'algorithme de Yen pourra être étendu en mode dynamique. Pour ce faire, il suffit d'étendre l'algorithme de Dijkstra vers une version généralisée. Dans le pseudo-code de l'algorithme de Yen, les lignes à modifier sont colorées en rouge.

Dans la bibliothèque JgraphT, un algorithme de recherche des k-plus courts chemins est déjà implémenté. L'algorithme se base sur l'idée présentée dans (Yen, 1971) avec quelques modifications qui sont colorées en vert dans la figure 104. Les modifications concernent l'algorithme utilisé pour le calcul du plus court chemin soit entre le point de départ et le point d'arrivée (initialisation de l'algorithme) soit entre le nœud de déviation et le point d'arrivée. Dans (Yen, 1971), l'algorithme utilisé est celui de Dijkstra tandis que dans la bibliothèque JgraphT l'algorithme adopté est celui de Bellman Ford. Dans notre contexte, et pour le calcul des k plus rapides chemins, l'algorithme

implémenté dans JgraphT a été retenu. Pour pouvoir prendre en considération la variation des estimations des temps de parcours selon les tranches horaires retenues, nous avons modifié l'algorithme de Bellman Ford en mode dynamique. L'algorithme a été testé sur une machine Intel Core i5 2,27Ghz + RAM 4Go. Le temps de réponse est de l'ordre de quelques secondes.

Conclusion

Le but de ce chapitre était de déterminer le meilleur mode de recherche d'itinéraires dans un contexte d'urgence. Dans un premier temps, nous avons étudié plusieurs types de graphes pour pouvoir modéliser le réseau routier. Quatre types de graphes ont été étudiés : les graphes statiques, dynamiques, par intervalles, et adjoints. Vu la particularité de notre projet, le graphe dynamique par intervalles est retenu. Ce choix est justifié d'une part par le fait que nos estimations du temps de parcours varient selon les quatre tranches horaires « reste de la journée », « 7h-9h », « 11h30-14h » et « 16h30 -9h ». D'autre part, il permet de prendre en considération l'incertitude sur l'estimation du temps de parcours. De plus, pour rendre le poids sur un arc routier déterministe, nous nous inspirons de l'idée de (Hizem, 2008) qui consiste à appliquer un degré d'optimisme sur l'intervalle de temps de parcours. Dans le chapitre suivant, nous présentons en détails l'adaptation de cette notion dans notre contexte. Dans un deuxième temps, et pour choisir le meilleur mode de recherche d'itinéraire, nous avons dressé une hiérarchie des différents modes possibles. Deux versions pour l'implémentation de notre moteur de recherche d'itinéraires ont été retenues : le plus rapide chemin et les k-plus rapides chemins dépendants du temps. Pour la version de la recherche des k-plus courts chemins, nous avons directement utilisé l'algorithme de la variante de bellman Ford déjà implémenté dans la bibliothèque JgraphT. L'algorithme a été modifié pour pouvoir prendre en considération la variation du temps de parcours en fonction des tranches horaires retenues dans notre projet.

Dans le chapitre suivant, nous présentons une démarche méthodique pour la conception et l'implémentation d'un système d'aide à la prise en compte de la perturbation du trafic en temps réel. De plus, le système sert d'outil d'aide à la détection des incidents. De même, nous montrons aussi le principe d'intégration de notre moteur de recherche d'itinéraire dans notre système.

Chapitre 6 Un système d'aide à la détection des incidents et à la prise en compte des événements exceptionnels pour le calcul d'itinéraire en temps réel

Introduction

Dans le chapitre 4, nous avons présenté notre méthodologie pour l'estimation du temps de parcours. Deux arbres et des règles de décision sont générés dans le but de prédire le temps de parcours au cas où l'on a peu d'observations enregistrées (passage des trajectoires sur les tronçons routiers). Le premier arbre se compose des éléments suivants : les tranches horaires, les largeurs des chaussées et le nombre de voies. Dans le cas où la largeur des chaussées ou le nombre de voies n'est pas renseigné dans notre base de données routière, nous avons généré un deuxième arbre de décision construit à partir des facteurs liés au niveau d'importance du tronçon routier. D'autres facteurs pouvant influencer sur l'état du trafic tels que les conditions météorologiques et les événements exceptionnels ne sont pas pris en compte lors de la création des règles de décisions. Pour résoudre ce problème, nous proposons dans ce chapitre une conception et une implémentation d'un système d'aide à la prise en compte des événements exceptionnels pour le calcul d'itinéraire en temps réel. Le système intégrera aussi notre moteur de calcul d'itinéraires.

6.1 Problématique

De nos jours, la congestion routière ne cesse d'augmenter dans les grandes villes. Elle peut provoquer des conséquences de différents ordres (OCDE, 1999) :

- Ecologiques : Une augmentation du nombre de véhicules sur une route peut dégrader la qualité de l'air (Nesamani et al., 2005).
- Economiques : la congestion routière est susceptible de provoquer un temps supplémentaire pour se déplacer d'un lieu de départ vers un lieu d'arrivée. Ce temps perdu peut engendrer des pertes économiques. A titre d'exemple, le coût de la congestion a été évalué à 779 millions de dollars dans la région de Montréal.

D'après (Fhwa., 2003), la congestion peut être divisée en deux types : la congestion récurrente et la congestion non récurrente.

La congestion récurrente est due à des phénomènes qui perturbent l'état normal du trafic. Ces perturbations se répètent quotidiennement. Généralement, ce type de congestion est causé par les embouteillages (figure 106) dans les heures de pointes du matin et du soir.



Figure 106 Routes congestionnées suite à un embouteillage

La congestion non récurrente peut être définie comme étant toute perturbation exceptionnelle de l'état normal du trafic. Parmi les événements exceptionnels pouvant perturber le trafic, on peut citer les travaux publics, les manifestations, les conditions météorologiques (figure 107), les accidents et les événements sportifs.



Figure 107 Routes congestionnées suite à la chute de neige

Dans notre projet, et dans le but de chercher le meilleur itinéraire pour le service d'urgence, il est très important de prendre en considération tous les événements exceptionnels prévus ou imprévus qui peuvent influencer sur l'état normal du trafic. Afin de bien mener notre étude, nous essayons de répondre aux questions suivantes :

1) Comment tenir compte des conditions météorologiques lors de la recherche d'itinéraire ?

2) Comment prendre en considération la congestion non récurrente (événements exceptionnels prévus qui peuvent perturber le trafic sur un réseau routier tels que les travaux publics et les manifestations,...etc) ?

3) Comment tenir compte des événements imprévus qui peuvent influencer sur le trafic d'un réseau routier tels que les accidents et les embouteillages occasionnels ?

4) Comment rectifier les estimations des temps de parcours dans le cas où il y aurait des changements des caractéristiques physiques du réseau routier (élargissement de la largeur des chaussées, modification du nombre de voies.etc) ?

Afin d'apporter des réponses aux questions présentées ci-dessus, notre idée consiste à proposer une méthodologie pour la conception et l'implémentation d'un système d'information d'aide à la prise en compte des événements exceptionnels pour le calcul d'itinéraire en temps réel. Notre système sera directement couplé avec la base de données de temps de parcours et avec notre moteur de recherche d'itinéraires.

Notre idée de base est de concevoir un système qui communique avec plusieurs acteurs dispersés géographiquement tels que : « Météo France » pour récupérer les conditions météorologiques, deux acteurs nommés « mairie » et « système de surveillance du trafic en temps réel » pour détecter les événements exceptionnels prévus et imprévus et enfin un dernier acteur nommé « IGN » qui sert à envoyer les informations liées aux changements des caractéristiques physiques du réseau routier (figure 108).

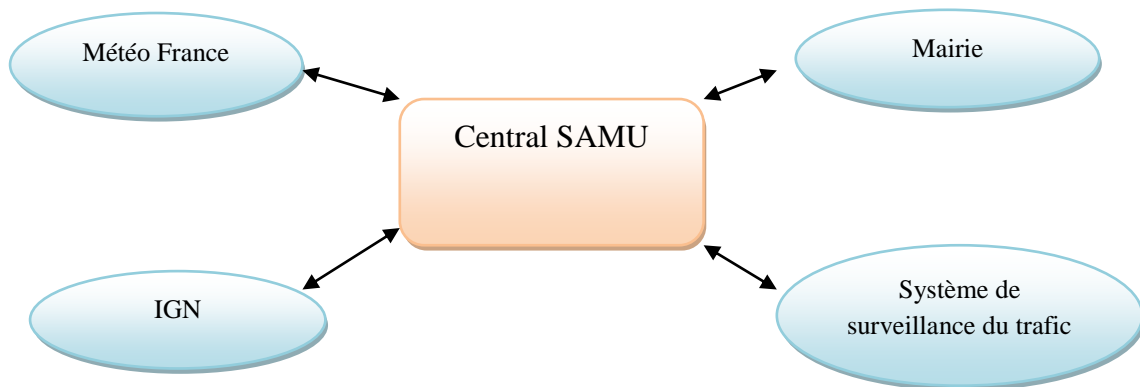


Figure 108 Acteurs intervenant dans notre système d'information

6.2 Conception et implémentation d'un système d'aide à la prise en compte des événements exceptionnels pour le calcul d'itinéraires en temps réel

Afin de réaliser notre système, nous proposons la démarche suivante.

A) Choix du système réparti : Remote Procedure Call (RPC) ou application de messagerie

La première étape consiste à étudier le mode de fonctionnement des systèmes informatiques répartis de type RPC (service web) et les applications de messagerie. Nous présentons aussi les domaines d'application de ces systèmes. L'objectif de cette étude est de pouvoir choisir le système le plus adapté pour notre problématique.

B) Présentation générale du concept de message

Dans la deuxième phase, nous décrivons la notion générale de message. Nous présentons les différents types ainsi que les éléments constituant un corps de message.

C) Choix du modèle : pub/sub ou le modèle point à point

Au niveau de la troisième phase, nous présentons les deux modèles qui peuvent être utilisés pour l'implémentation d'une application de messagerie : pub / sub et point à point. Nous étudions les scénarios possibles d'utilisation de ces modèles. Cette étude sera bénéfique lors du choix de l'un de ces derniers pour notre projet.

D) Conception et implémentation d'une architecture d'aide à la prise en compte des événements exceptionnels pour le calcul d'itinéraires en temps réel

Dans la quatrième phase de notre méthodologie, nous présentons l'architecture de notre système et les différents acteurs qui y interviennent. Pour notre étude conceptuelle, nous décrivons les diagrammes suivants : cas d'utilisation, d'activités, de composant et de déploiement. Pour l'implémentation, nous détaillons les paquetages de productions et de consommations des messages. Enfin, nous mettons en œuvre un mécanisme pour la gestion d'erreurs et les tests unitaires sur notre système.

6.2.1 Un système basé sur des services web ou une application de messagerie

De nos jours, et dans les technologies des systèmes d'informatiques réparties, on distingue plusieurs catégories telles que celles des systèmes qui utilisent les services web et celles à base de messagerie. Dans cette section, nous allons étudier ces deux types de système. Cette étude sera une base solide pour la justification de la catégorie la plus adaptée pour notre projet.

Pour assurer une communication (échanges d'informations) entre différentes applications ou systèmes dispersés géographiquement, les systèmes basés sur les services web s'avèrent une solution idéale.

La spécificité majeure de ce type de système se traduit par le fait qu'il exige une connexion de type requête/ réponse. Autrement dit, une application demandeur d'informations doit impérativement invoquer un service web. Cette dernière traite la requête envoyée par l'application demandeur d'informations et lui renvoie la réponse (figure 109).

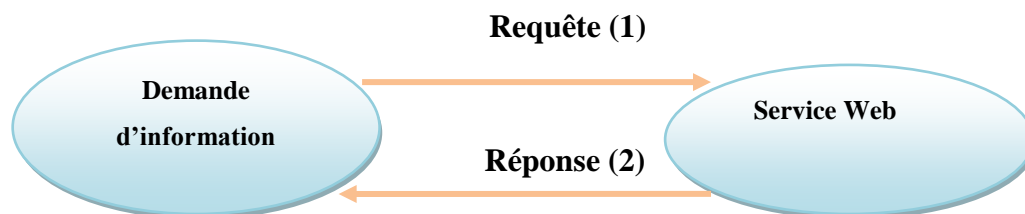


Figure 109 Schéma requête/réponse entre deux applications

A titre d'exemple de service web, on cite le service « previmeteo6 ». Il propose plusieurs services en relation avec la prévision des conditions météorologiques comme les cartes et les données météorologiques (vitesses et directions du vent, températures minimales et maximales,...) pour trois périodes par jour (le matin, l'après-midi et le soir).

Afin d'étudier la fiabilité de ce type de système, nous allons présenter un scénario d'application basé sur l'utilisation des services web et qui sera proche de notre problématique.

On rappelle que notre système se compose de cinq acteurs : « Météo France », « Mairie », « Système de surveillance du trafic en temps réel » et « SMUR » (une application hébergée chez le service d'urgence).

Le scénario de la communication des applications est défini de la façon suivante :

L'application « SMUR » envoie plusieurs requêtes de demande d'informations aux différents acteurs de notre système tels que « mairie », « IGN », « système de surveillance du trafic » et « Météo France ».

Les requêtes se dérouleront de la façon suivante.

⁶ <http://www.previmeteo.com>

- **Requête 1** : l'application « SMUR » demande des informations auprès de l'application « Météo France ».
- **Requête 2** : l'application « SMUR » demande des informations auprès de l'application « mairie ». L'application « SMUR » pourra alors récupérer toutes les informations liées aux événements exceptionnels prévus qui peuvent influencer sur le trafic.
- **Requête 3** : l'application « SMUR » demande de l'information auprès de l'application « IGN ». À partir de cette demande, l'application « SMUR » récupérera tous les changements des caractéristiques physiques du réseau routier.
- **Requête 4** : l'application « SMUR » demande de l'information sur le niveau du trafic. Cette requête sera envoyée à l'application « système de surveillance du trafic en temps réel ».
- **Requête 5** : L'application « système de surveillance du trafic » pourra demander des informations auprès de l'application « mairie ».

En effet, notre idée de base est de pouvoir chercher le meilleur itinéraire qui sera évidemment le plus rapide. Pour cela, la base de données du réseau routier doit être mise à jour en temps réel par toute information pouvant influencer sur l'état normal du trafic. Deux scénarios peuvent donc être envisagés :

1er scénario (demandes d'informations en parallèle avec la recherche d'itinéraire)

Les requêtes 2, 3, 4 et 5 peuvent être lancées en même temps que le moteur de recherche d'itinéraire. Dans ce cas le calculateur d'itinéraires va consommer un temps significatif avant de retourner l'itinéraire. Cela est dû au temps mis par le système pour envoyer les demandes d'informations, récupérer les réponses auprès des acteurs et mettre à jour la base de données du réseau routier. Dans notre contexte, cette perte de temps pourra être décisive pour la vie d'un patient en détresse. Afin de résoudre ce problème, on propose un deuxième scénario. Concernant la requête 1, elle peut être programmée par exemple pour être lancée chaque jour à six heures du matin.

2ème scénario (programmation automatique des demandes d'informations)

Dans le deuxième scénario, on pourra programmer automatiquement les demandes des informations auprès des différents acteurs de notre système. La requête 1 peut être programmée chaque jour à six heures du matin.

Concernant les autres requêtes, et pour garantir la récupération des informations les plus récentes en temps réel, les requêtes 2, 3, 4 et 5 peuvent être programmées par exemple toutes les cinq minutes.

Cependant, en appliquant le deuxième scénario, le risque de ne pas mettre à jour la base de données par des informations pouvant influencer sur l'état normal du trafic persiste. On présente le scénario suivant comme exemple:

L'application « mairie » réalise une action qui consiste à bloquer entièrement une rue. La tâche a été réalisée à 9h 07 par exemple. Pour récupérer les informations auprès de l'application « mairie », nous avons programmé la requête numéro 2 pour chaque intervalle de 10 minutes. Par coïncidence, cette requête va être envoyée vers 9h 10. Supposons maintenant que les urgentistes lancent le calculateur d'itinéraire vers 9h 08. Dans ce cas, le moteur de recherche retourne un itinéraire sans tenir compte des dernières informations issues de l'application « mairie ». A partir de cet exemple, on constate bien que même avec le deuxième scénario, ce type de système ne répond pas totalement à nos besoins.

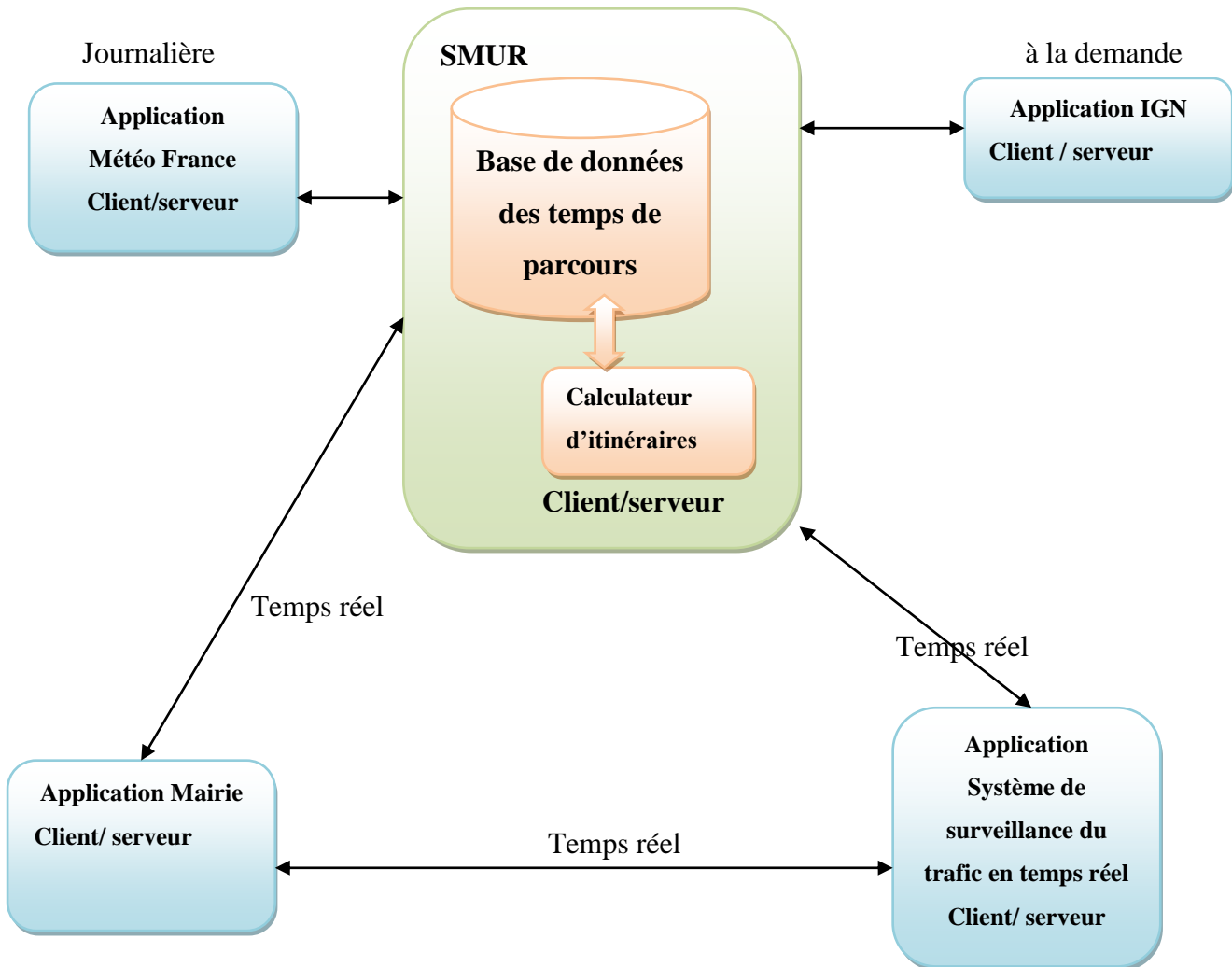


Figure 110 Schéma de communication d'application basé sur les services web

De plus, dans les deux scénarios présentés auparavant, et dans l'instant où l'acteur SMUR demande des informations, les services web peuvent tomber en panne ou être surchargés. Le cas de surcharge peut provoquer un temps de retard significatif pour que le système retourne l'itinéraire. En revanche, dans le cas où les acteurs tombent en panne, il y aura un grand risque que le moteur de recherche d'itinéraire retourne un chemin sans tenir compte des informations pouvant perturber l'état normal du trafic.

3 ème scénario (l'acteur SMUR en panne)

Un troisième scénario peut être envisagé. Il concerne le cas où l'acteur SMUR tombe en panne juste après ses demandes d'informations auprès des différents acteurs. Pour résoudre ce problème, le concepteur de l'architecture du système doit impérativement programmer une base de données temporaire. Elle stockera les informations retournées par les acteurs au cas où l'acteur « SMUR » n'est pas disponible. De plus, le concepteur doit programmer une procédure de récupération de ces informations auprès de cette base de données.

Afin de résoudre les différents problèmes présentés dans les trois scénarios, d'autres alternatives peuvent être utilisées, tels que les systèmes de messageries.

Dans ce concept, les applications communiquent par le biais des messages. Une application ou un client peut en envoyer ou en consommer. Leur transfert est réalisé grâce à un serveur de messagerie nommé aussi middleware orienté message (MOM) (figure 111).



Figure 111 Schéma général du mode de fonctionnement du concept de messagerie

Le concept de messagerie est caractérisé par les points suivants:

- ✚ La communication entre applications ou clients est de type asynchrone (toute application productrice de message n'attend pas le bon acquittement de l'application consommatrice).
- ✚ La distribution des messages est garantie. Le concept de messagerie propose un mécanisme de « stockage » et « retransmet » des messages. Ce mécanisme est très utile dans le cas où l'application consommatrice des messages est en panne (acteur « SMUR », scénario numéro 3).
- ✚ Le concepteur d'une application de messagerie n'est pas censé programmer un temps d'arrêts pour l'intégration ou la suppression d'autres applications au système. Dans notre problématique, on pourra ajouter les pompiers comme un nouvel acteur.

En se basant sur le concept de messagerie, notre système peut être modélisé de la façon suivante (figure 112) :

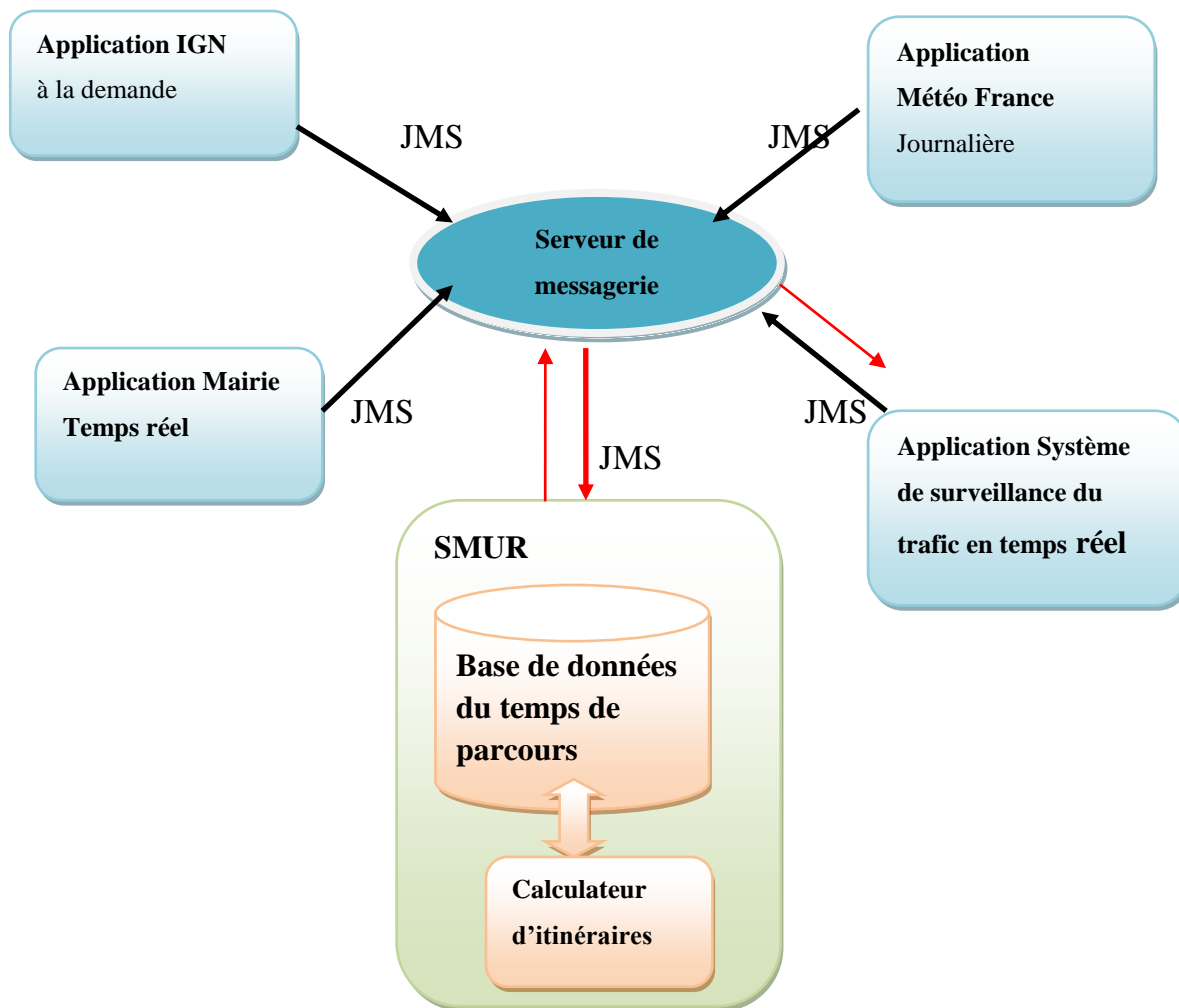


Figure 112 Schéma de communication d'application basé sur le concept messagerie

Toutes les applications de notre système telles que « mairie », « IGN », « Météo France » et « Système de surveillance du trafic » envoient les informations nécessaires vers un serveur de messagerie en temps réel. Ce dernier transmet ces informations vers l'acteur « SMUR ». Notre idée de base est d'attendre l'information plutôt que de la demander. Un contrat doit être établi avec ces acteurs. Dans ce type de contrat, on précise les types d'informations demandés auprès de chacun de ces acteurs et les formats spécifiques des messages transportant ces informations. Dans la section suivante, nous présenterons en détail le concept de messagerie.

6.2.2 Présentation de la notion de message

Un message Java Message Service (JMS) peut être défini comme étant un véhicule qui transporte des données entre applications ou encore un processus de notification d'événements. L'objet Message constitue la partie essentielle de la spécification JMS. Contrairement aux systèmes répartis

(Remote Procedure Call) tels que les services web, le producteur d'un message JMS n'attend pas une réponse de la part d'un consommateur.

Dans les sections suivantes, nous présentons un résumé sur les différents types de messages, leurs descriptions générales et les différents modèles qui peuvent être utilisés dans une application de messagerie (Haase., 2002).

6.2.2.1 Les différents types des messages

Généralement, les fournisseurs JMS proposent au minimum six interfaces **Message**. Message est l'interface de base parmi ces dernières. Les cinq autres interfaces sont: **TextMessage**, **StreamMessage**, **MapMessage**, **ObjectMessage** et **BytesMessages** (figure 113).

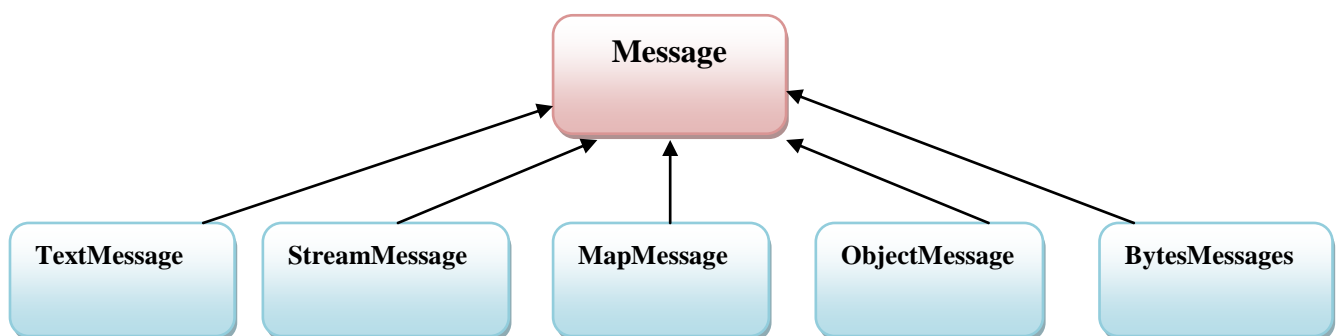


Figure 113 Hiérarchie des interfaces de Message

Le mode d'utilisation de ces interfaces est lié aux types de données transportées. Par exemple, l'interface **TextMessage** peut être utilisée pour le transport des données de type texte ou encore des documents en formats XML. Concernant l'interface **ObjectMessage**, elle transporte comme charges des objets java.

6.2.2.2 Description générale du corps d'un message

Un objet message comprend trois parties : l'en-tête, les propriétés et le corps. Dans cette section, nous allons présenter en détail chacune de ces parties (figure 114).

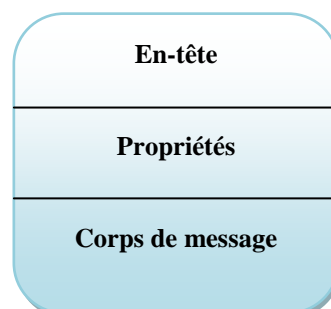


Figure 114 Caractéristique d'un message

✓ L'en-tête

On peut définir l'en-tête d'un message comme étant une métadonnée qui le caractérise. Il peut être une information liée à la date de sa création ou de son expiration.

Les en-têtes peuvent être généralement divisés en deux groupes : ceux qui sont automatiquement affectés aux messages et d'autres définis par le concepteur d'une application de messagerie.

a) Les en-têtes affectés automatiquement

Généralement, chaque fournisseur de JMS propose des en-têtes bien spécifiques. Le concepteur d'une application de messagerie n'a pas un privilège total de modification sur ce type d'en-têtes.

Comme exemples d'en-têtes on présente :

- **JMSDestination** qui joue un rôle fondamental dans une application de messagerie puisqu'il permet de fixer la destination d'un tel message,
- **JMSExpiration** qui a pour rôle de fixer la date d'expiration du message. Ce type d'en-tête est très utile si les données transportées par le message ont une durée de vie.

b) Les en-têtes affectés par le concepteur

Outre que les en-têtes définis par le fournisseur de JMS, le concepteur a la possibilité de définir ses propres en-têtes. Ce type de privilège joue un rôle essentiel pour la personnalisation de l'application de messagerie. Comme exemples d'en-têtes on peut citer :

- **JMSType** qui identifie la structure et le type de données transportées par le message. L'utilité de ce type d'en-tête se traduit par la possibilité d'échanger des informations avec d'autres clients non JMS et qui ont besoin de connaître les types des données reçues lors de leur traitement.
- **JMSReplyTo** qui est utilisé dans le cas où un producteur de messages exige une réponse de la part du consommateur.

✓ Les propriétés

Les messages sont également caractérisés par leurs propriétés. Ces dernières peuvent être définies comme étant des en-têtes supplémentaires à un message.

A ce niveau, le concepteur a une liberté totale lors de la définition de ces propriétés. On peut citer comme exemple d'une propriété le fait d'associer un « nom d'utilisateur » à un producteur de message.

✓ Le corps de message

On peut définir un corps de message comme étant la charge utile transportée par ce dernier. Il peut contenir une chaîne de caractère ou encore un fichier de type Pdf, texte..etc.

6.2.3 Les différents modèles du concept messagerie

Dans le concept de messagerie, on distingue deux modèles : la messagerie publication / abonnement et le point à point. Dans cette section, nous présentons ces deux modèles ainsi que leurs différences. Le but de cette étude comparative est de pouvoir en choisir un pour notre étude.

6.2.3.1 Le modèle publication / abonnement

Pratiquement, tous les fournisseurs de JMS proposent un modèle de type publication / abonnement (pub/sub) (figure 115). Le modèle est essentiellement caractérisé par les points suivants :

- ✓ Un producteur de message peut envoyer un message à plusieurs applications ou clients (consommateurs) par l'intermédiaire d'une rubrique. Afin de recevoir les messages, les consommateurs doivent y être impérativement connectés.
- ✓ Les consommateurs reçoivent des messages de la rubrique sans avoir à les demander. De plus, le producteur et le consommateur de message ne se connaissent pas.
- ✓ Au cours de l'exécution de l'application de messagerie, l'administrateur peut ajouter des producteurs et des consommateurs de messages.

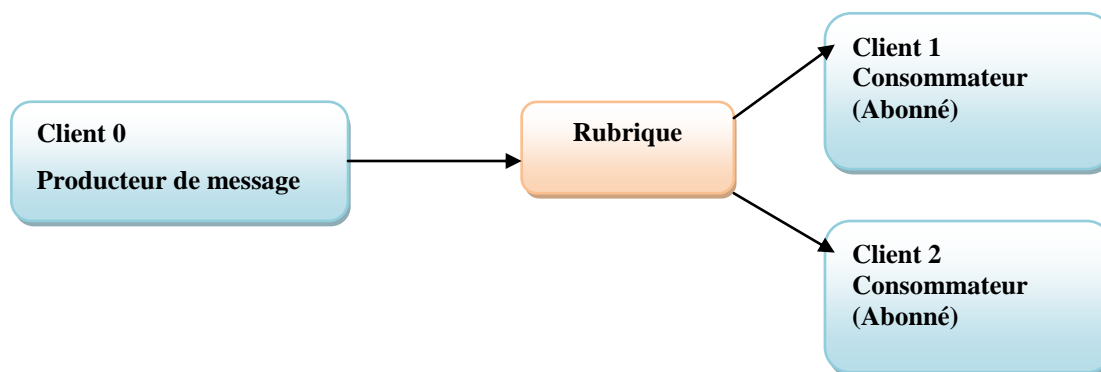


Figure 115 Schéma général du principe du modèle Publication / abonnement

6.2.3.2 Le modèle point à point

De même que le modèle pub / sub, le modèle point à point est généralement pris en considération par la plupart des fournisseurs de JMS (figure 116). Il est caractérisé par les points suivants :

- ✓ L'échange des messages est assuré par une file. Cette dernière est une destination des messages envoyés par les clients producteurs, ainsi qu'une source pour les clients consommateurs des messages.
- ✓ Chaque message est envoyé à un et un seul consommateur.
- ✓ Il est possible d'ajouter des clients producteurs ou consommateurs en cours d'exécution de l'application de messagerie.

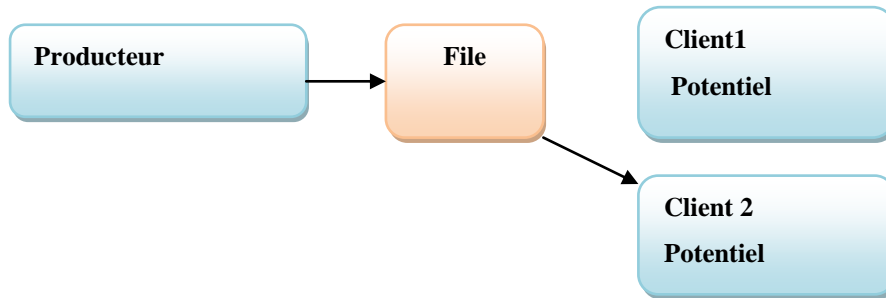


Figure 116 Schéma général du principe du modèle Point à point

6.2.3.3 Discussion et choix du modèle pour notre projet

Les deux modèles de messageries présentés auparavant peuvent être utilisés dans notre projet. Deux architectures sont envisageables.

1^{er} cas :

Dans notre problématique, le modèle pub / sub pourra par exemple être utilisé dans le cas où l'on dispose de plus qu'un seul centre de SAMU qui bénéficiera des informations issues de l'application « Météo France ». Par conséquent, l'architecture idéale sera présentée de la façon suivante (figure 117) :

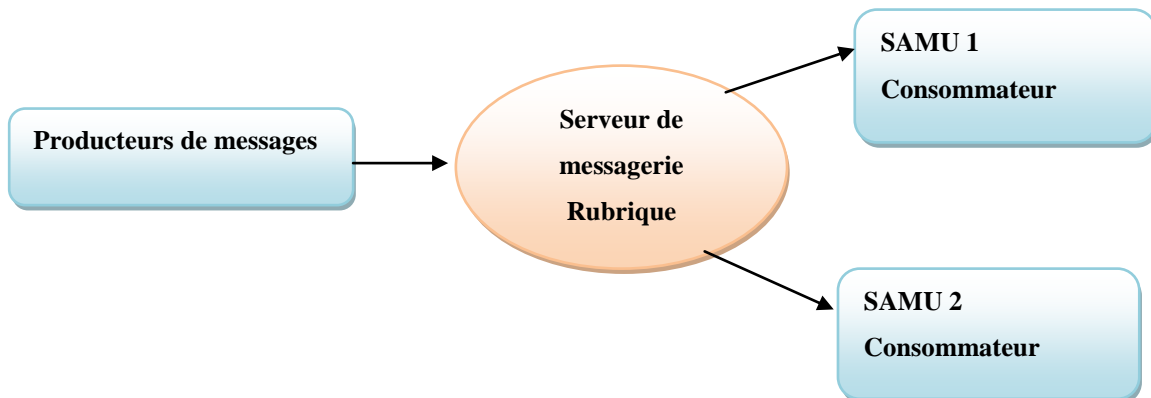


Figure 117 Architecture basée sur le modèle pub / sub

Pour illustrer l'utilité de ce modèle, nous imaginons le scénario suivant :

Soient deux centres de SAMU : SAMU1 et SAMU2. Le premier est localisé au Mans, tandis que le deuxième est basé à La Flèche (Le Bailleul) où se trouve le Pôle Santé Sarthe et Loire. L'acteur « Météo France » envoie les conditions météorologiques selon les zones géographiques et avec une granularité journalière. Prenons l'exemple du scénario suivant :

Une application « Météo France » émet un message contenant l'information sur les conditions météorologiques du Mans. Les deux acteurs SAMU1 et SAMU2 vont recevoir le même message.

L'acteur SAMU1 le traite et procède par l'affinement du temps de parcours selon les conditions météorologiques, tandis que l'acteur « SAMU2 » ignore le message.

Dans notre zone d'étude, on ne dispose que d'un centre de SAMU/SMUR. Pour cela, et dans notre conception de l'architecture de notre système, nous nous orientons vers le modèle point à point.

2^{ème} cas :

Dans le cas où l'on dispose d'un seul service d'urgence à gérer par notre système, il est préférable d'utiliser le modèle point à point. L'architecture pourra être définie de la façon suivante (figure 118) :

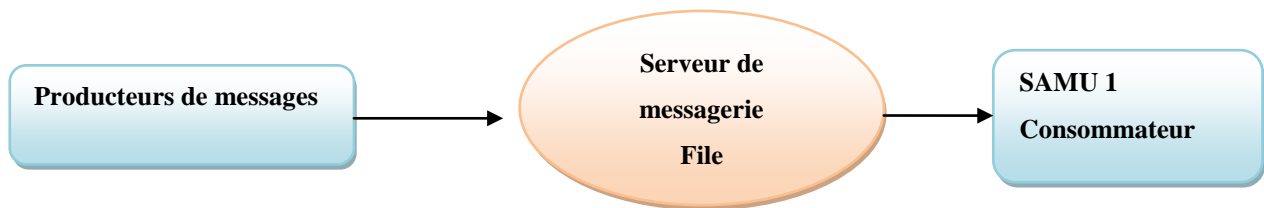


Figure 118 Architecture basée sur le modèle point à point

Chaque producteur connaît la destination des messages et poste les messages directement dans la file du consommateur

6.2.4 Proposition d'une architecture

Dans cette section, nous allons présenter dans un premier temps une architecture générale de notre système que nous allons détailler dans un second temps.

6.2.4.1 Architecture générale

Le diagramme général de notre système comprend trois composantes.

La première composante englobe tous les acteurs participant à notre système. Ces acteurs ou applications (Mairie, Météo France, IGN, système de surveillance du trafic en temps réel) seront nécessaires pour la fourniture en temps réel des données qui peuvent influencer sur l'état normal du trafic ou sur les estimations du temps de parcours réalisées auparavant.

Les informations récupérées en temps réel seront définies de la façon suivante :

- Information météorologique

Notre idée consiste à récupérer la condition météorologique par ville avec une granularité journalière. Pour ce faire, on définit trois catégories très générales : beau temps, temps pluvieux ou temps neigeux.

- Information de la mairie

Après l'analyse des arrêtés municipaux de la ville du Mans pour l'année 2011, nous constatons que 63% des événements sont de type travaux publics, 7% sont liés à des livraisons et 30% ont pour cause des manifestations. Un événement est caractérisé par deux composantes : une composante temporelle et une autre spatiale.

- ❖ La composante temporelle décrit la durée de vie d'un événement. On cite les exemples suivants qui recouvrent l'ensemble des cas rencontrés.
 - La circulation est interdite entre deux dates différentes, par exemple du 21/02/2011 au 26/02/2011.
 - La circulation est interdite entre deux heures dans le même jour, par exemple de 8h à 16h le 12/04/2011).
 - La circulation est interdite pour plusieurs jours sur une plage horaire qui se répète, par exemple du 16/05/2011 au 20/05/2011 de 14h à 18h.
- ❖ La composante spatiale nous renseigne sur le lieu d'un tel événement. On en présente les exemples suivants.
 - La circulation est interdite sur l'ensemble d'une rue, par exemple la circulation est interdite sur la rue « Bartholdi ».
 - La circulation est interdite sur une rue entre deux intersections, par exemple la circulation est interdite sur la rue « Crétois » et entre les rues « Bara » et « Bérard ».
 - La circulation est interdite sur une rue à partir d'un point et sur une distance précise, par exemple la circulation est interdite sur la rue « Victor Hugo » sur 150 mètres à partir de la rue « Nationale ».
 - La circulation est interdite sur une rue devant des numéros d'habitations précis, par exemple la circulation est interdite devant les numéros 20 et 22 de la rue « Roussillon ».

- Information trafic

Afin de récupérer l'état du trafic en temps réel ou pour localiser un accident, nous exploitons des informations issues d'un système de surveillance du trafic.

- Information IGN (un organisme qui pilote la mise à jour de la base de données routière)

Pour récupérer ce type d'informations, nous imaginons un organisme nommé IGN. Ses actions seront :

- l'ajout ou la suppression de tronçons routiers,
- la modification d'attributs de tronçons routiers relatifs à ses caractéristiques physiques (largeur de chaussée par exemple) ou sémantiques (son nom).

La deuxième composante de notre système est le client SMUR. Géographiquement, cette application pourra être hébergée chez le service d'urgence du Mans. Elle se compose d'un calculateur d'itinéraires, d'une base de données qui contient le réseau routier enrichi par des estimations du temps

de parcours réalisées auparavant et un producteur de message qui sert à envoyer les itinéraires générés au système de surveillance du trafic en temps réel.

La troisième composante de notre système sera le serveur de messagerie. Il englobe les files d'attente utilisées pour stocker les informations issues des différents acteurs. Il est à souligner que cette composante joue un rôle fondamental pour notre système. En effet, toutes les informations envoyées par les différents acteurs seront stockées et en attente dans ces files avant d'être consommées. Pour éviter le risque de saturation, on définit une file d'attente pour chaque acteur producteur de messages.

6.2.4.1.1 Diagramme général

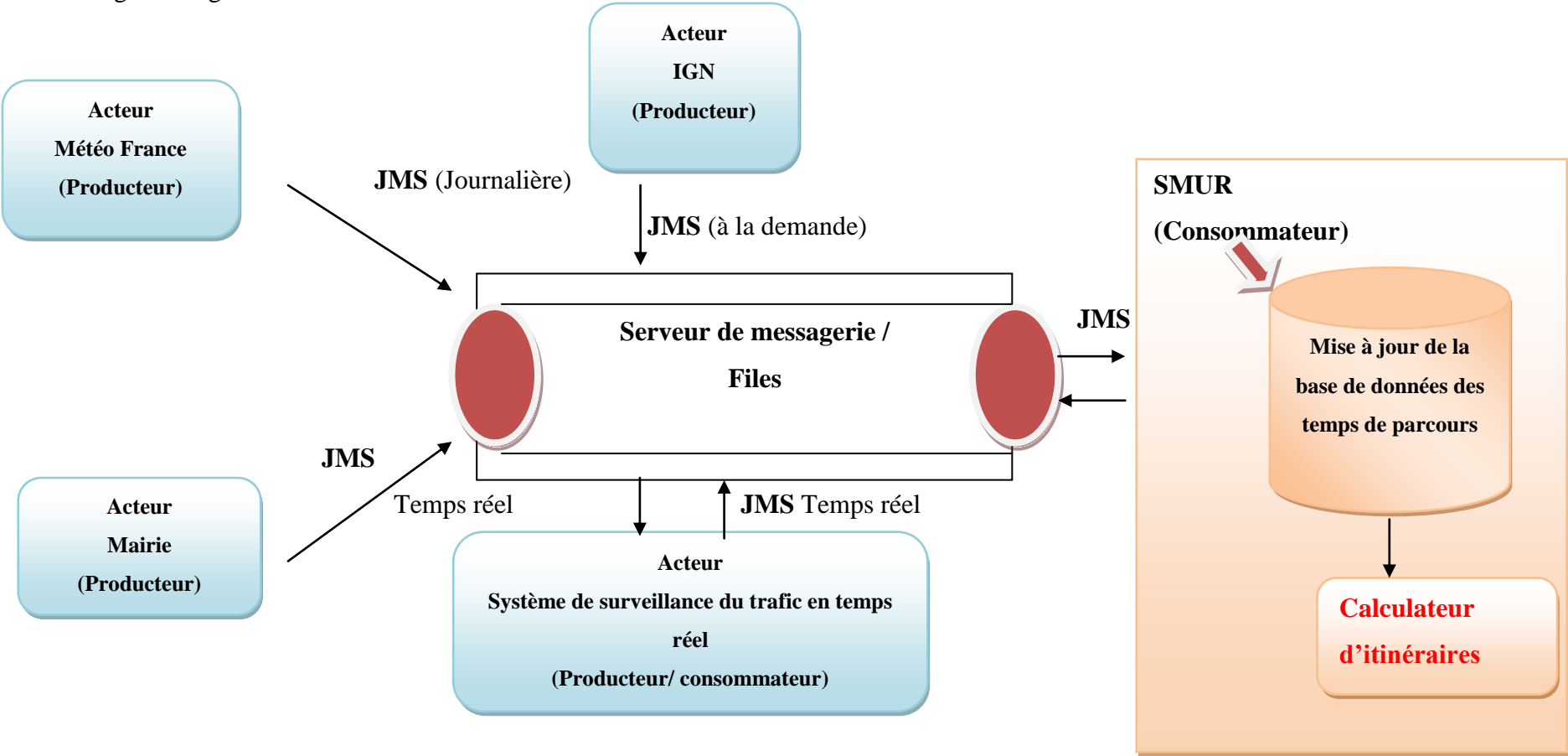


Figure 119 Diagramme général du système

6.2.4.1.2 Cas d'utilisation général

Dans le diagramme de cas d'utilisation de notre système, nous distinguons trois groupes d'acteurs. Le premier groupe englobe tous les acteurs qui peuvent influencer sur les estimations du temps de parcours stockées dans notre base de données routière. Le deuxième groupe d'acteurs sera les ambulanciers (figure 120). Deux actions peuvent être provoquées.

- Les ambulanciers procèdent par une recherche d'itinéraires pour une intervention. Les lieux de départ et d'arrivée seront connus en avance.
- L'itinéraire retourné par notre calculateur sera transmis vers le système de surveillance du trafic en temps réel. Un contrôleur de ce système pourra commander à distance les barrières automatiques et les feux tricolores localisés sur l'itinéraire renvoyé par notre calculateur.

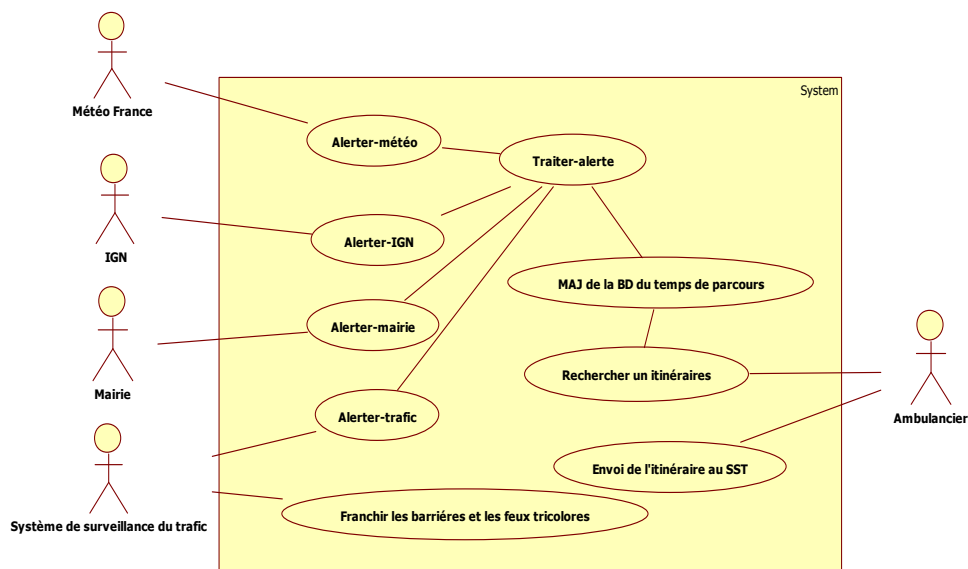


Figure 120 Cas d'utilisation général de notre système

Le dernier groupe d'acteurs de notre système concerne les contrôleurs du système de surveillance du trafic en temps réel.

6.2.4.2 Architecture Détaillée

6.2.4.2.1 Cas d'utilisation détaillé

Dans le diagramme de cas d'utilisation général, le premier groupe d'acteurs contient les producteurs des messages. Le deuxième groupe se compose d'un seul acteur qui sera l'utilisateur de notre calculateur d'itinéraires.

1^{er} Groupe d'acteurs

Le premier groupe comprend quatre producteurs de messages : Météo France, Système de surveillance de trafic, la mairie et l'institut géographique national. Dans la figure 121, on présente un diagramme de cas d'utilisation qui sera similaire pour tous les producteurs de messages.

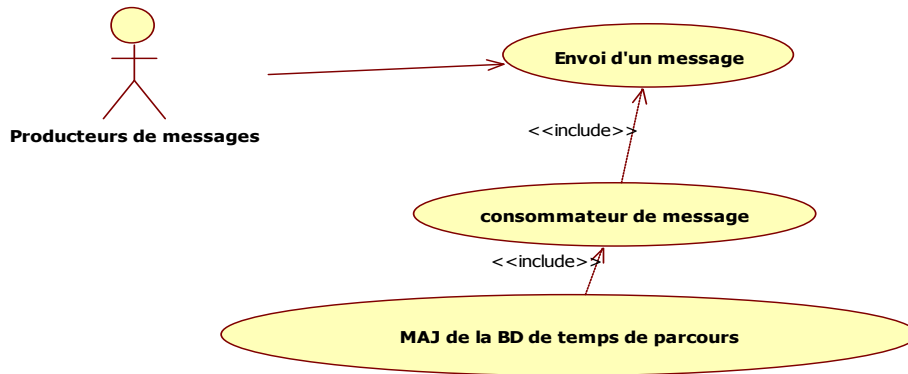


Figure 121 Diagramme cas d'utilisation général pour tous les acteurs

Les producteurs des messages réalisent deux actions sur notre système. Ils sont définis de la façon suivante :

✓ 1^{ère} action

La première action réalisée par l'acteur producteur de messages tels que Météo France, l'IGN, le système de surveillance du trafic en temps réel et la mairie consiste à envoyer un message au système. Il contient des informations selon le producteur du message. A titre d'exemple, l'acteur « Météo France » enverra un message sur les conditions météorologiques de la journée.

✓ 2^{ème} action

Une fois le message reçu par la file, notre système lance une notification d'événement. Elle consiste à réaliser une mise à jour de la base de données routière ou encore rectifier les estimations de temps de parcours. Dans le cas où le message est envoyé par l'application « Météo France », nous appliquons un degré d'optimisme δ qui varie selon la condition météorologique (figure 122) :

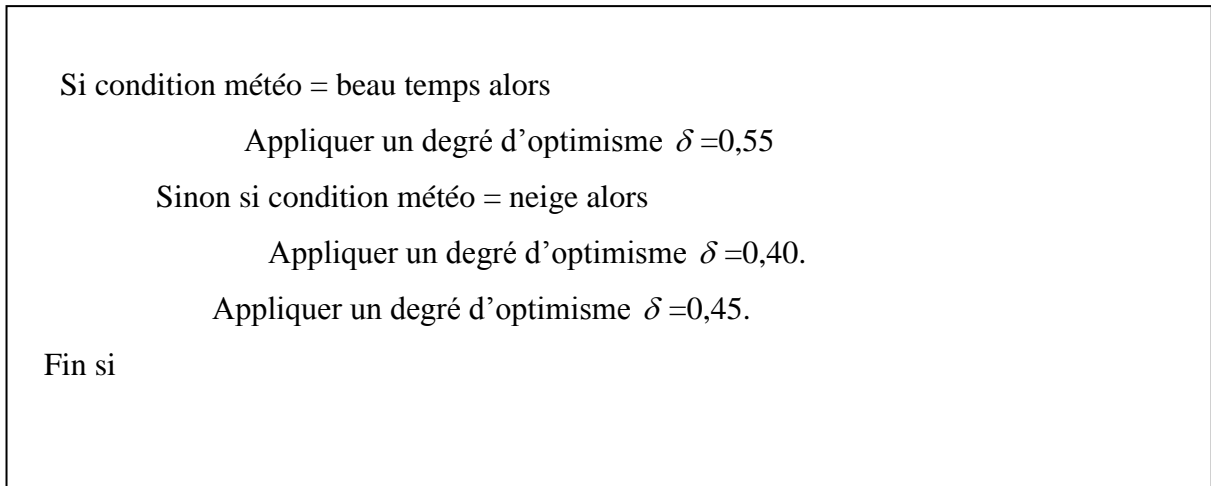


Figure 122 Exemple d'application d'un degré d'optimisme selon les conditions météorologiques

Nous rappelons ici que la fonction de coût pour chaque arc routier est définie de la façon suivante :

$$P(i, j, t) = \frac{\text{longueur}(i, j)}{(a'_{ij} + (b'_{ij} - a'_{ij}))}$$

avec a'_{ij} et b'_{ij} représentent respectivement la borne inférieure et

supérieure de l'intervalle de vitesse sur un arc routier dans une tranche horaire. La fonction du coût varie selon les conditions météorologiques et sera exprimée de la façon suivante :

$$P(i, j, t) = \frac{\text{longueur}(i, j)}{(a'_{ij} + (b'_{ij} - a'_{ij}) \times \delta)}$$

2^{ème} groupe d'acteurs

Le deuxième groupe d'acteurs de notre système représente les utilisateurs (les ambulanciers) de notre calculateur d'itinéraires. Deux actions sont provoquées par ce groupe. La première consiste à chercher un itinéraire pour une intervention. Ils ont le choix entre deux versions, soit un seul et unique chemin le plus rapide soit les k premiers chemins optimaux (figure 123). Afin de minimiser le risque de blocage, la deuxième version sera avantageuse dans le cas où deux équipes partent pour une même intervention en empruntant chacune un chemin différent.

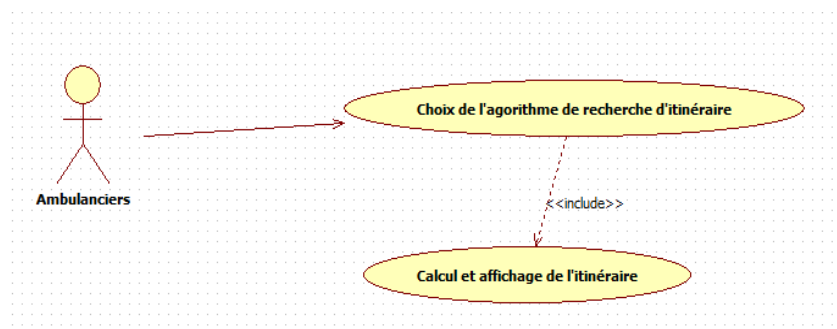


Figure 123 Diagramme cas d'utilisation pour l'acteur ambulancier

La deuxième action consiste à envoyer l'itinéraire retourné par notre calculateur vers le système de surveillance du trafic (figure 124). Ensuite, un contrôleur du système de surveillance du trafic pourra commander les feux tricolores et les barrières automatiques présentes sur l'itinéraire.

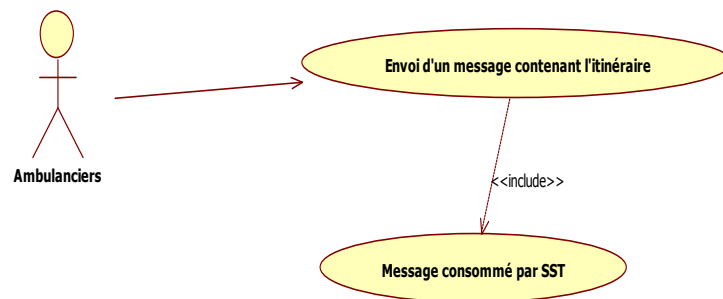


Figure 124 Diagramme cas d'utilisation pour l'acteur ambulancier

6.2.4.2.2 Diagramme d'activité (Clients producteurs de messages)

Dans cette section, on présente un diagramme d'activité qui sera le même pour tous les clients producteurs de messages (figure 125). L'ordre chronologique du diagramme d'activité commence par l'envoi d'un message. Une fois le message stocké dans la file d'attente, le serveur de messagerie teste si le consommateur du message est actif ou non.

Dans le cas où le consommateur du message est actif, le message sera consommé par le « consommateur du message ». Par conséquent, un événement de mise à jour de la base de données du temps de parcours sera lancé. Le type de l'événement lancé dépend de la nature du « producteur du message » et du type de l'action programmée. Sinon, si le consommateur du message est inactif, ce dernier sera stocké dans la file d'attente avant d'être consommé.

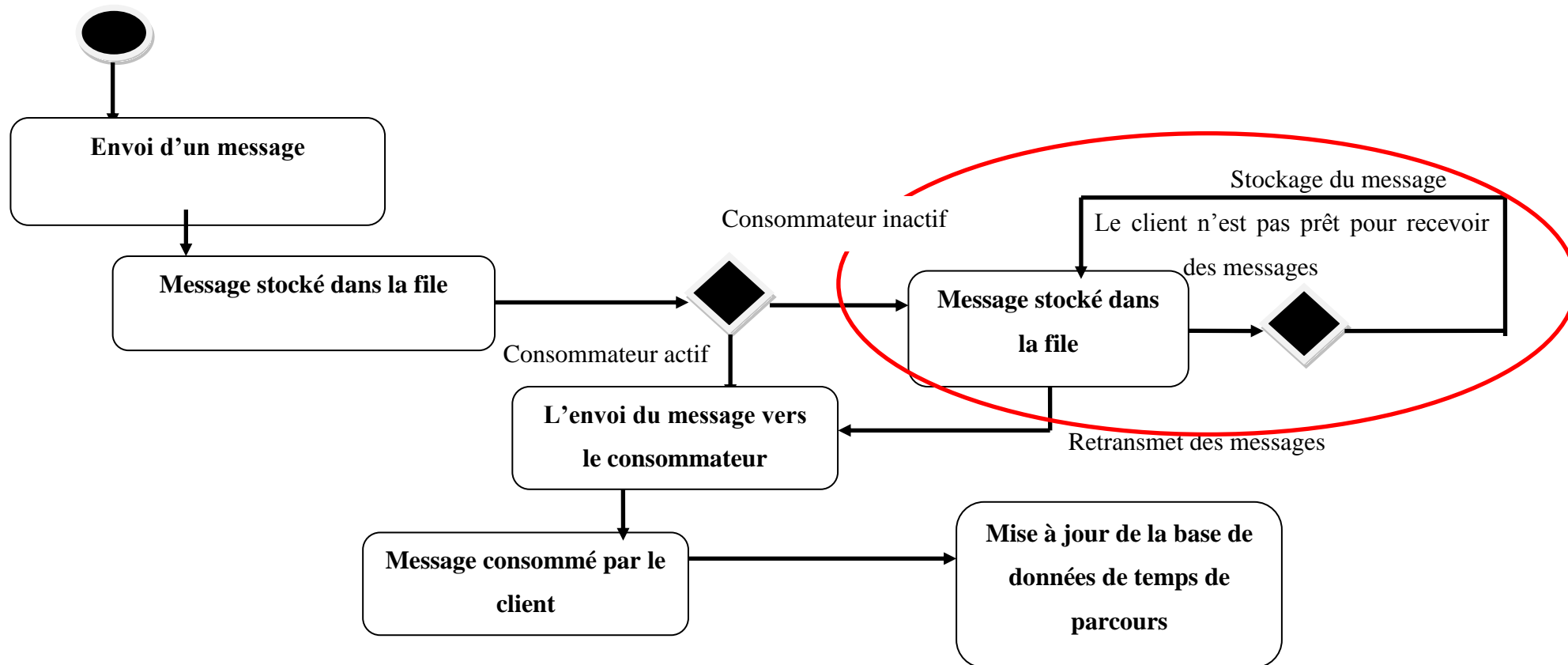


Figure 125 Diagramme d'activité d'envoi et de réception des messages

6.2.4.3 Présentations des corps des messages et les actions provoquées

Dans cette section, nous présentons les corps des messages produits par chaque client producteur de messages défini dans notre architecture. Chacun peut produire plusieurs types de messages et pour chaque type de message, on définit un type d'action bien défini.

6.2.4.3.1 Messages provenant de l'application « Météo France »

L'application « Météo France » envoie un seul type de message. Il est caractérisé par deux en-têtes : JMSDestination et JMSMessageID. L'en-tête JMSDestination est nécessaire pour fixer la destination du message. Concernant JMSMessageID il joue le rôle d'un identificateur du message. Il est caractérisé par une propriété de type chaîne de caractère nommée « Action ». Dans cette propriété, on définit l'action menée par ce type de message. La charge utile du message se compose du nom de la ville et de ses conditions météorologiques (figure 126).

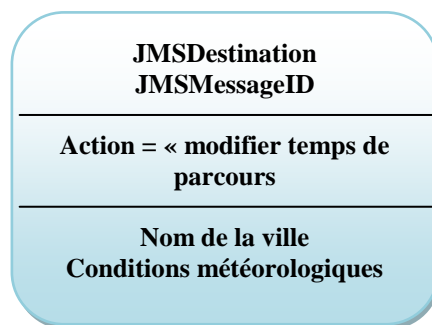


Figure 126 Structure du message envoyé par l'application « Météo France »

Pour rendre les poids des arcs déterministes, nous appliquons un degré d'optimisme sur les intervalles des vitesses et ceci selon les conditions météorologiques. Nous retenons par exemple les degrés d'optimisme suivants :

- Beau temps : $\delta = 0,55$,
- Pluvieux : $\delta = 0,45$,
- Neigeux : $\delta = 0,40$.

On précise que le degré d'optimisme δ a été choisi approximativement pour être optimiste ou pessimiste selon les conditions météorologiques. Le poids d'un arc routier sera présenté comme ci-après :

$$P(i, j, t) = \frac{\text{longueur}(i, j)}{(a_{ij}^t + (b_{ij}^t - a_{ij}^t) \times \delta)}$$

Nous précisons qu'il était possible d'intégrer directement les conditions météorologiques dans le processus d'estimation du temps de parcours. Cependant, on aurait eu un arbre de décision très étoffé

avec un nombre d'éléments (observations des vitesses) très peu significatif. Pour cela, nous estimons que l'utilisation de la notion du degré d'optimisme sera une deuxième solution pour la prise en compte de l'impact des conditions météorologiques sur le temps de parcours.

6.2.4.3.2 Messages provenant de l'application « Mairie »

L'application « Mairie » a la possibilité d'envoyer trois catégories de messages (figure 127). Chaque type est caractérisé par sa propriété de type chaîne de caractère et par sa charge utile. Le premier type de message est caractérisé par une action égale à « bloquer entièrement la rue ». Pour ce type, le consommateur accorde un temps de parcours très élevé sur la route « Nom rue 1 » à partir de la date « Date time début ». Une fois que la date de fin de l'événement « Date time fin » est atteinte, on rétablit toute modification menée sur la base de données des temps de parcours.

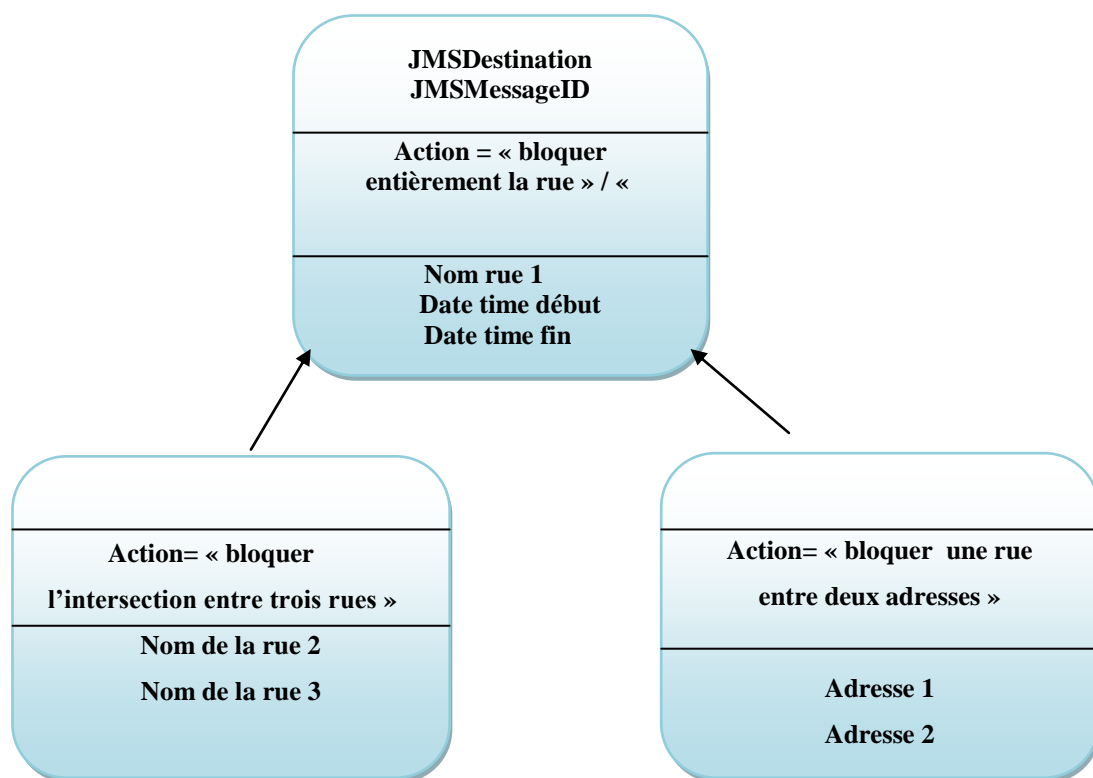


Figure 127 Présentation des différents types de messages provenant de l'application « Mairie »

Le deuxième type de message envoyé par la mairie est caractérisé par une action égale à « bloquer l'intersection entre trois rues ». Sa consommation est pratiquement similaire au premier type présenté auparavant. Pour déterminer la géométrie de l'intersection entre les trois rues, le consommateur lance une fonction **Localiser_geo_rue (rue1, rue2, rue3)** écrite en PL/pgsql. Par application de l'algorithme du plus court chemin Dijkstra, la fonction

Localiser_geo_rue (rue1, rue2, rue3) renvoie la géométrie de l'intersection entre les trois rues. L'action du troisième type de message envoyé par la mairie consiste à bloquer une partie d'une rue localisée entre deux adresses. Afin de récupérer sa géométrie, le consommateur lance une fonction **Localiser_geo_adresse (rue1, adresse1, adresse2)** écrite en Plpgsql.

6.2.4.3.3 Messages provenant de l'application « Système de surveillance du trafic en temps réel »

Les messages envoyés par le système de surveillance de trafic en temps réel sont caractérisés par trois types d'actions possibles. Les deux premières actions peuvent être soit un blocage total ou un déblocage d'un tronçon routier (figure 128). La charge utile du message contient alors seulement l'identificateur du tronçon routier. Ce type d'action pourra être lancé dans le cas où le système détecte un bouchon (réseau saturé).

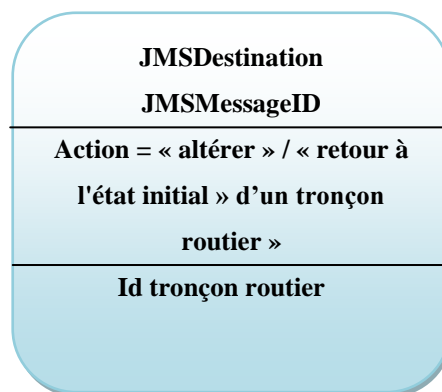


Figure 128 Structure d'un message envoyé par un système de surveillance du trafic en temps réel

Le troisième type d'action peut être lié à l'envoi d'une photo. Cette action est très bénéfique dans le cas où le système détecte un accident. Ce type d'action pourra informer les urgentistes sur la gravité de l'accident. La charge utile du message contient la photo en format Pdf par exemple et l'identificateur du tronçon routier.

6.2.4.3.4 Messages provenant de l'application « IGN »

L'application IGN envoie trois types de messages. Les actions des messages peuvent être l'ajout, la mise à jour des caractéristiques physiques et sémantique ou encore la suppression d'un tronçon routier (figure 129). Pour les deux premières actions, les vitesses moyennes et leurs écarts types accordés au tronçon routier seront déterminés à partir des règles de bases. Dans ce cas, le consommateur du message fait appel aux règles de décisions définies auparavant. Par exemple, si le message envoyé dispose d'une action égale à « ajouter un tronçon routier » et comme la largeur des chaussées est supérieure à 5 mètres et inférieure ou égale à 7 mètres et avec un nombre de voies inférieur ou égal à 2, alors le consommateur du message procède par l'ajout d'un tronçon routier dans la base de données routière renseigné pour chaque période temporelle retenue pour notre projet par une vitesse moyenne égale à 88km/h et un écart type égal à 29km/h.

Dans le cas où la largeur des chaussées n'est pas renseignée, on fait appel au deuxième arbre basé sur le facteur lié à l'importance de la route.

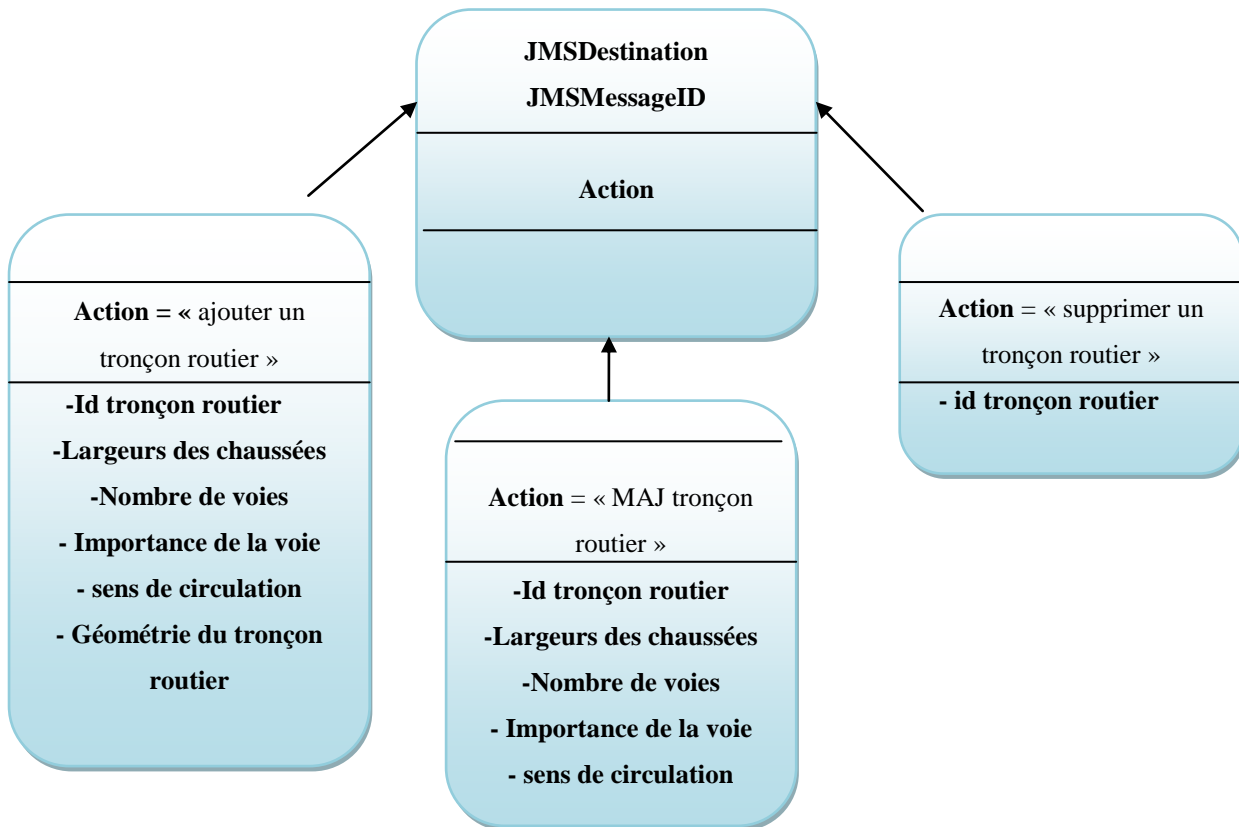


Figure 129 Structure des messages envoyés par l'application « IGN »

6.2.4.3.5 Message provenant du SMUR

Un seul type de message est envoyé par le client SMUR. Il contient un fichier contenant la ou les géométrie(s) des itinéraires retournés par notre calculateur (figure 130).

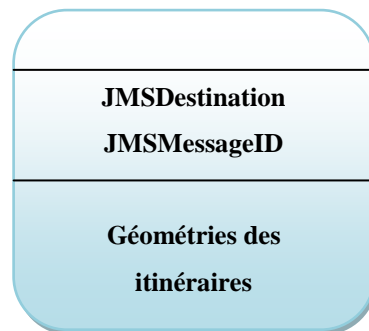


Figure 130 Structure d'un message envoyé par le client SMUR

Dans notre application, une fonctionnalité d'enregistrement des itinéraires en plusieurs formats est prise en compte. Cette fonctionnalité pourra faciliter la lecture des fichiers envoyés par la composante SMUR.

6.2.4.4 Protocole de communication (Implémentation)

Dans cette section, nous présentons les différents éléments nécessaires pour l'implémentation de notre système. Dans un premier temps, nous étudions les fournisseurs de JMS vis-à-vis de leurs versions, la compatibilité avec les systèmes d'exploitation, les types d'architectures et le modèle adapté. L'un de ces fournisseurs sera retenu pour notre projet. Dans un deuxième temps, nous décrivons le diagramme de déploiement, de composant, le paquetage « producer messages » pour envoyer les messages et « consumer messages » pour leur réception. Enfin, nous terminons par une présentation d'un protocole d'évaluation de notre système.

6.2.4.4.1 Choix de fournisseurs JMS

Dans cette section, nous allons présenter quelques fournisseurs (serveurs) de JMS. Pour chaque type, nous détaillerons la version de JMS utilisée, le système d'exploitation supporté, le type d'architecture adapté et s'il existe un outil pour administrer l'envoi et la réception des messages.

| Fournisseurs | Version JMS | Système d'exploitation | Architecture | Modèle JMS | Interface d'administration des messages |
|---------------------------|-------------|---|----------------------|--|---|
| MQSeries version 5.1 | 1.0.2 | 2000, NT, Sun Solaris | Centralisée/répartie | Point à Point / Publication-abonnement | non |
| SonicMQ 3.0 | 1.0.2 | Adapté à toute plate-forme disposant d'une machine virtuelle Java | Centralisée | Point à Point / Publication-abonnement | non |
| FioranoMQ 4.5 | 1.0.2 | Adapté à toute plate-forme disposant d'une machine virtuelle Java | Répartie | Publication-abonnement | non |
| Java Message Queue 1.1 | 1.0.2 | Win NT/Win2000/ | Centralisée | Point à Point / Publication-abonnement | oui |
| ActiveMQ 5.6 (opensource) | 1.1 | Adapté à toute plate-forme, dispose d'une machine virtuelle Java | Centralisée/répartie | Point à Point / Publication-abonnement | oui |

Tableau 10 Présentation de quelques fournisseurs de JMS

Après l'étude menée sur les différents fournisseurs de JMS (tableau 10), nous avons décidé de retenir le fournisseur ActiveMQ pour notre projet. Notre choix de ce fournisseur est argumenté par ces différents points :

- ✚ L'utilisation d'un fournisseur avec une licence « open source » sera un atout pour différents profils d'utilisateurs.
- ✚ Il est possible d'installer le serveur sur plusieurs plates-formes.
- ✚ Le concepteur peut choisir une architecture de type centralisée ou répartie.
- ✚ Deux modèles de JMS peuvent être envisagés : le modèle point à point ou publication abonnement.

- Le fournisseur possède une interface de contrôle des messages. Elle facilite la tâche pour administrer leur envoi et leur réception (figure 131).

Queues

| Name ↑ | Number Of Pending Messages | Number Of Consumers | Messages Enqueued | Messages Dequeued | Views | Operations |
|-------------------|----------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------|----------------------|
| queue.smur.fm | 0 | 3 | 2 | 2 | Browse Active Consumers atom rss | Send To Purge Delete |
| queue.smur.ign | 0 | 3 | 2 | 2 | Browse Active Consumers atom rss | Send To Purge Delete |
| queue.smur.mairie | 0 | 3 | 2 | 2 | Browse Active Consumers atom rss | Send To Purge Delete |
| queue.smur.trafic | 0 | 3 | 2 | 2 | Browse Active Consumers atom rss | Send To Purge Delete |

Figure 131 Interface d'administration des messages (ActiveMQ)

Les « Queues » du fournisseur ActiveMQ sont définies de la façon suivante :

« **Name** » représente les noms des queues définies dans l'architecture.

« **Number of pending** » désigne les messages en attente d'être consommés.

« **Number of consumers** » correspond au nombre des consommateurs.

« **Messages Enqueued** » est la désignation du nombre des messages envoyés.

« **Messages Dequeued** » représente le nombre de messages envoyés et consommés.

Pour mettre en œuvre notre architecture, nous avons développé deux paquetages « SMURProducer » et « SMURConsumer ». Le fonctionnement du paquetage « SMURProducer » est similaire aux applications tels que « mairie » ou encore « système de surveillance du trafic en temps réel ».

Concernant le paquetage « SMURConsumer », son rôle consiste à consommer des messages puis à lancer des événements sur la base de données des temps de parcours. Les différents messages proviennent des différentes applications.

Pour l'implémentation des deux paquetages, nous avons utilisé Java comme langage de programmation.

6.2.4.4.2 Diagramme de déploiement

Un diagramme de déploiement de notre système est créé pour les différents composants de notre architecture (figure 132). On s'intéresse essentiellement à la localisation géographique des serveurs pour chaque application.

Chaque application productrice des messages (IGN, Mairie, Météo France et le système de surveillance du trafic) pourra être hébergée dans un serveur d'application. Ce dernier sera localisé dans les locaux de son organisme.

Les serveurs JMS et l'acteur SMUR seront hébergés dans les locaux du SMUR du Mans. La base de données de temps de parcours, le paquetage « consommateur de messages », le calculateur d'itinéraires et le paquetage « producteur de messages » contenant l'itinéraire retourné par notre moteur de recherche seront hébergés dans le serveur SMUR.

Pour la communication entre les différents serveurs, on pourra utiliser le protocole TCP/IP.

Dans notre diagramme, on définit deux relations de dépendances.

- Les estimations du temps de parcours dépendent de la nature des messages envoyés par les différentes applications.
- Le chemin retourné par le calculateur d'itinéraire est basé sur les estimations du temps de parcours.

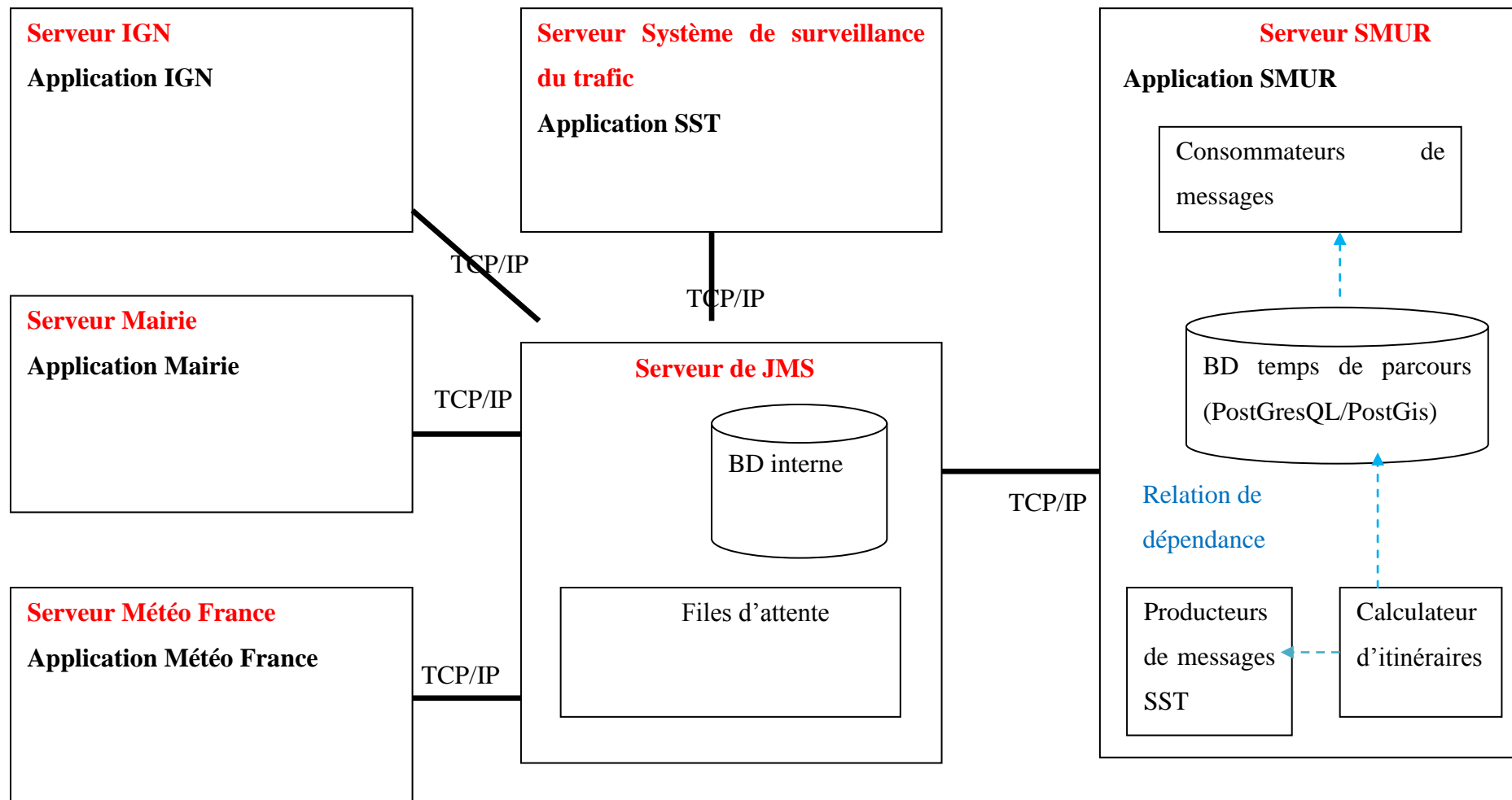


Figure 132 Diagramme de déploiement du système

6.2.4.4.3 Diagramme de composants

L'architecture générale de notre système se compose de trois éléments : les clients producteurs de messages, un serveur de JMS et un client SMUR (figure 133). Dans cette section, nous présentons ces composants pour chaque élément.

✓ **Les clients producteurs de messages**

Notre système établit une connexion avec plusieurs clients producteurs de messages : Météo France, l'IGN, le système de surveillance du trafic en temps réel et la mairie. Pour chacun de ces clients, on définit trois composants : une interface homme-machine pour l'administration de l'application, une base de données et un « JMS Provider » nécessaire pour envoyer les messages.

✓ **Le serveur de JMS**

Le serveur de JMS contient six composants. Trois files d'attente sont nécessaires pour la réception des messages provenant des applications « producteurs de messages » (Météo France, l'IGN, la Mairie et le système de surveillance du trafic en temps réel). Une autre file d'attente sera utilisée pour récupérer le message contenant l'itinéraire retourné par notre calculateur. Enfin, une base de données est utilisée pour stocker les messages en attendant que le client « consommateur de messages » soit actif.

✓ **Le client SMUR**

Le client SMUR comprend quatre éléments. Le premier contient quatre « JMS consumer » nécessaires à la consommation des messages provenant des applications connectées avec notre système. Le deuxième est la base de données de temps de parcours. Elle contient le réseau routier enrichi par les estimations du temps de parcours. Le troisième élément est le calculateur d'itinéraires. Enfin, le dernier élément sera un « JMS Provider ». Il est utilisé afin d'assurer l'envoi de l'itinéraire retourné par notre calculateur.

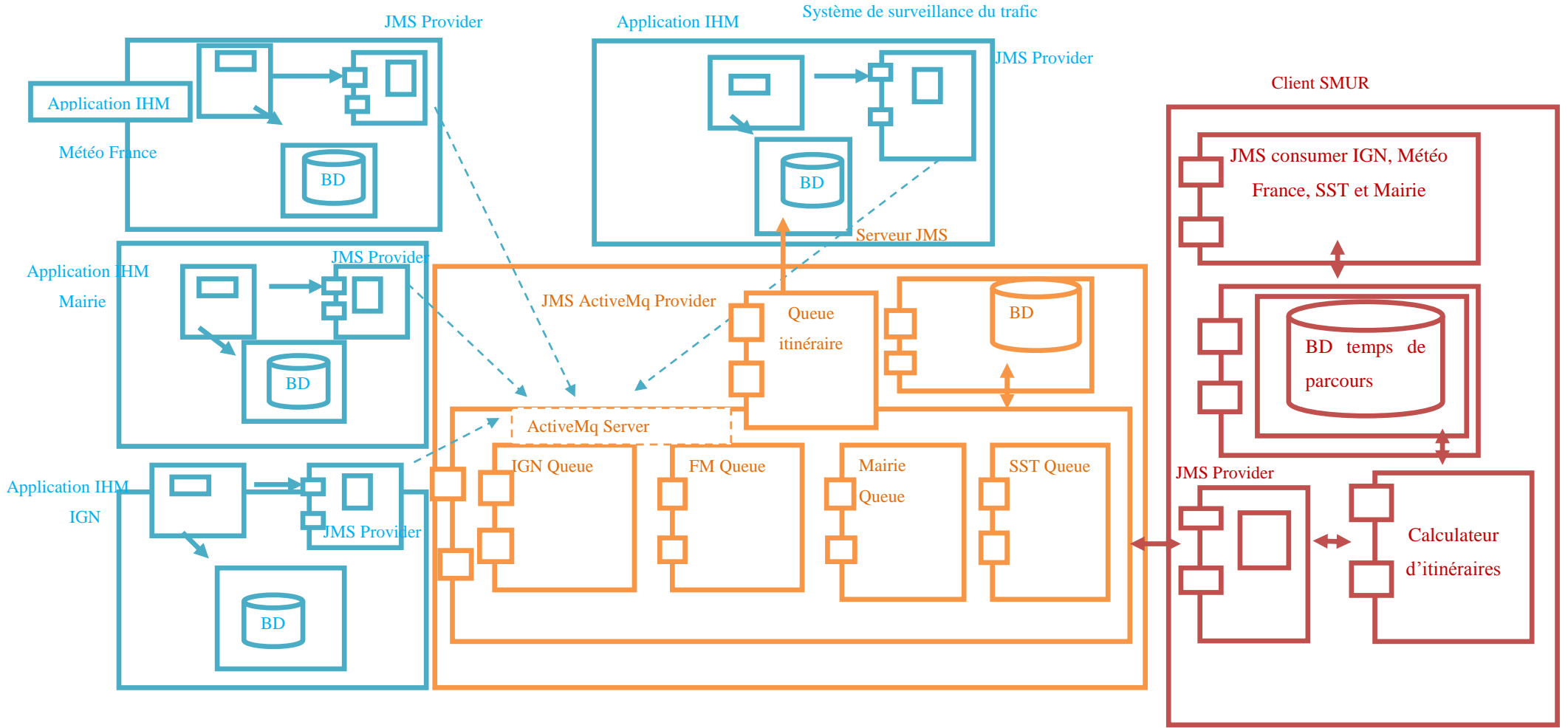


Figure 133 Diagramme des composants du système

6.2.4.4 Producteurs de messages

Le paquetage « SMURProducer » se compose de quatre classes : la classe « MessageFactory » pour créer l'objet Message, « ProviderConnection » pour se connecter au serveur JMS et « MessageSender » pour envoyer le message (figure 134).

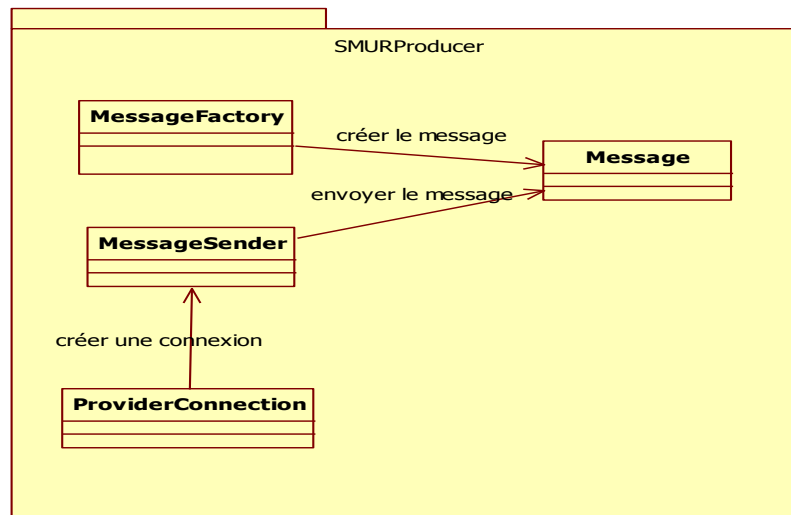


Figure 134 Paquetage SMURProducer

6.2.4.5 Consommateurs de messages

Le paquetage « SMURConsumer » contient cinq classes. La classe « ProviderConnection » est nécessaire pour créer une connexion avec le serveur JMS. La classe « MessageListener » est très utile pour détecter la source productrice du message (application mairie, France météo...etc.). Enfin, la classe « MessageProcess » sert à envoyer des événements pour modifier les estimations du temps de parcours (figure 135).

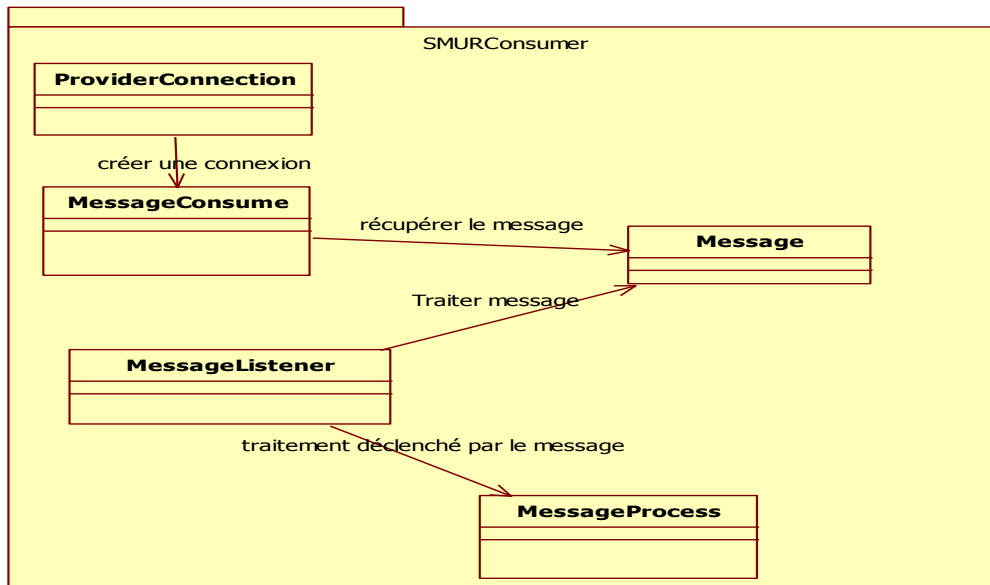


Figure 135 Paquetage SMURConsumer

6.2.4.5 Protocole d'évaluation (tests)

L'évaluation est une phase primordiale pour la construction des systèmes informatiques, ainsi que pour la fiabilité et les mesures de performances. Ces mesures d'évaluation nous permettent de bien connaître l'état de notre système face à des facteurs imprévus (parasites ou dysfonctionnement anormal). Pour ce faire, trois familles de tests sont réalisées : les tests unitaires pour tester l'envoi et la réception des messages, les tests fonctionnels pour étudier le fonctionnement normal de notre système et enfin les tests pour la gestion des cas d'erreurs

- Test unitaires

Dans la famille des tests unitaires, un seul scénario a été traité. Il consiste à étudier l'envoi et la réception d'un message. Ce test est réalisé par le biais de L'API java Junit.

| | |
|----------|---|
| Titre | Envoi et réception d'un message |
| Scénario | 1 – Lancer le composant SMUR. 2 – Lancer le composant Mairie. 3 - Envoyer un message de test. |
| Résultat | Message reçu par le composant SMUR |

Tableau 11 Test unitaire pour l'envoi et la réception des messages

- Tests fonctionnels (fonctionnement normal)

Le test fonctionnel de notre système consiste à lancer les différents types d'événements provenant des applications productrices de messages et à vérifier leurs impacts sur la base de données des temps de parcours. Dans les tableaux suivants, on présente les scénarios traités.

| | |
|-----------|---|
| Titre | Modification des conditions météorologiques |
| Scénario | 1 - Lancer le composant SMUR. 2- Lancer le composant Météo France. 3 - Envoyer un message contenant une information sur les conditions météorologiques. |
| Résultats | Rectification des estimations du temps de parcours selon le degré d'optimisme. |

Tableau 12 Test fonctionnel pour la modification des conditions météorologiques

| | |
|----------|--|
| Titre | Blocage tronçon routier |
| Scénario | 1 – Lancer le composant SMUR. 2 – Lancer le composant Mairie. 3 - Envoyer un message de blocage pour un tronçon routier et un intervalle de temps donné. |
| Résultat | Tronçon routier barré dans la base de données et débarré après l'écoulement de l'événement |

Tableau 13 Test fonctionnel pour le blocage d'un tronçon routier

| | |
|----------|---|
| Titre | Trafic réseau perturbé |
| Scénario | 1 – Lancer le composant SMUR. 2 – Lancer le composant système de surveillance du trafic. 3 - Envoyer un message de blocage pour un tronçon routier et un intervalle de temps donné. |
| Résultat | Tronçon routier barré dans la base de données et débarré après l'écoulement de l'événement |

Tableau 14 Test fonctionnel pour le trafic réseau perturbé

| | |
|----------|--|
| Titre | Changement caractéristique d'un tronçon routier |
| Scénario | 1 – Lancer le composant SMUR. 2 – Lancer le composant IGN. 3 - Envoyer un message pour ajouter un tronçon routier dans la base de données. |
| Résultat | Tronçon routier ajouté dans la base de données avec des estimations du temps de parcours basé sur les règles de décisions. |

Tableau 15 Test fonctionnel pour le changement caractéristique d'un tronçon routier

| | |
|----------|--|
| Titre | Envoi de l'itinéraire au système de surveillance de trafic routier |
| Scénario | 1 – Lancer le composant SMUR. 2 – Lancer le composant système de surveillance du trafic. 3 - Envoyer un message contenant le chemin retourné par notre calculateur d'itinéraires |
| Résultat | Le message est bien reçu par le système de surveillance du trafic |

Tableau 16 Test fonctionnel pour l'envoi de l'itinéraire au système de surveillance du trafic routier

- Cas d'erreurs

La dernière famille du protocole d'évaluation de notre système est la gestion des cas d'erreurs. Dans cette famille, nous traitons des scénarios tout en simulant des erreurs humaines (comme un message où manquent des données) ou encore des erreurs techniques comme le cas où un composant (IGN, SMUR..etc) est injoignable.

| | |
|----------|---|
| Titre | Paramètre manquant dans le corps du message (date de blocage non renseignée dans un message de la Mairie) |
| Scénario | 1 - Lancer le composant SMUR. 2 - Lancer le composant Mairie. 3- Envoyer un message de blocage pour un tronçon routier et un intervalle de temps donné. |
| Résultat | Message non traité (retour d'un code d'erreur) |

Tableau 17 Gestion d'erreur pour un paramètre manquant dans le corps d'un message

| | |
|----------|---|
| Titre | Destinataire inconnu (pas de consommateur prédéfini au niveau du SMUR) |
| Scénario | 1 - Lancer le composant SMUR. 2 - Lancer le composant Mairie. 3- Envoyer un message de blocage pour un tronçon routier et un intervalle de temps donné. |
| Résultat | Message non traité (retour d'un code d'erreur) |

Tableau 18 Gestion d'erreur pour un destinataire inconnu

| | |
|----------|--|
| Titre | Tronçon routier inexistant |
| Scénario | 1 – Lancer le composant SMUR. 2 – Lancer le composant IGN. 3 - Envoyer un message pour ajouter un tronçon routier dans la base de données. |
| Résultat | Retour d'un code d'erreur |

Tableau 19 Gestion d'erreur pour un tronçon routier inexistant

| | |
|----------|--|
| Titre | Composant SMUR injoignable |
| Scénario | <p>1 - Lancer le composant SMUR.</p> <p>2- Lancer le composant Météo France.</p> <p>3 - Envoyer un message contenant une information sur les conditions météorologiques.</p> |
| Résultat | Le message sera stocké dans la base de données. Une fois que le composant SMUR devient joignable, le message sera consommé |

Tableau 20 Gestion d'erreur pour un composant injoignable

Dans cette section, nous avons présenté trois familles de tests pour tester et évaluer le bon fonctionnement de notre architecture. Toutes les fiches de tests ont été réalisées avec succès sur une machine - Intel Core i5 2,27GHz + RAM 4Go. De plus, nous estimons que ces fiches de tests pourront être réutilisées lors de la mise en place de notre architecture.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthodologie dans le but de concevoir et d'implémenter un système d'information pour l'aide à la prise en compte de la perturbation du trafic pour le calcul d'itinéraires en temps réel. Notre idée était de prendre en considération les différents événements exceptionnels prévus ou imprévus lors de la recherche d'itinéraires. Dans notre méthodologie, nous avons présenté tous les diagrammes nécessaires pour l'implémentation de notre système.

Malgré les avancées dans les technologies des systèmes informatiques répartis (par exemple les services web), nous estimons qu'une application de messagerie répond amplement à nos besoins. D'une part, on propose un ensemble de formats de messages bien spécifiques qui pourront être utilisés par les différents acteurs intervenant dans notre système. D'autre part, une application de messagerie propose un mécanisme de garantie et de transmission des messages. Ce mécanisme est assuré par une base de données associée aux files d'attente. En parallèle avec ce mécanisme, la technologie JMS assure l'extensibilité de notre architecture sans causer un dysfonctionnement au système. Comme exemple, on pourra ajouter une application pour les sapeurs pompiers.

Au niveau de l'implémentation de notre architecture, nous avons présenté deux paquetages standards pour l'envoi et la réception des messages. Concernant le protocole d'évaluation de notre système, nous avons traité trois familles de tests : unitaires, fonctionnelles et une famille de gestion des erreurs.

Conclusion et perspectives

Les travaux effectués durant cette thèse ont porté sur la conception et l'implémentation d'un système d'information pour le calcul d'itinéraire destiné au service d'urgence. Afin de réaliser notre système, nous avons divisé notre travail en plusieurs étapes : la modélisation des données spatio-temporelles pour l'estimation de vitesses de parcours, l'analyse statistique pour la prédiction de vitesses de parcours, le meilleur mode de recherche d'itinéraire dans un contexte d'urgence et enfin la modélisation et la conception d'un système d'aide à la prise en compte des perturbations du trafic pour le calcul d'itinéraires en temps réel.

Les moteurs de recherche d'itinéraire destinés au grand public se basent généralement sur des limitations de vitesses de parcours. Vu la sensibilité de notre contexte, notre idée était d'exploiter la connaissance du terrain par les ambulanciers pour estimer les temps de parcours. En vue de réaliser cette tâche, nous estimons que la technique dite « véhicule traceur » est la technique la plus adaptée. Une base de données des trajectoires empruntées par le service d'urgence lors de son intervention est mise en place. Dans l'objectif de pouvoir finement mener notre étude sur l'estimation des vitesses de parcours issue des différentes trajectoires sauvegardées dans notre base, nous avons abordé un axe de recherche lié à la modélisation et à la gestion des données spatio-temporelles.

L'une de nos contributions est liée à la proposition d'un nouveau modèle de trajectoires. Le modèle est historique, libre et modifié. Il est historique puisque notre étude est en post-traitement, libre car on garde la forme réelle des trajectoires et enfin modifié puisqu'on établit la relation entre la trajectoire et le réseau routier. L'idée de garder la forme réelle des trajectoires permet notamment de pouvoir corriger les erreurs dues à l'application du processus du map-matching. Ce type de correction est réalisé manuellement dans le cas où le tronçon trajectoire est qualifié d'« incertain ». De plus, pour pouvoir enrichir le réseau routier par des estimations des temps de parcours, il est nécessaire de garder la relation entre les trajectoires et le réseau routier.

Concernant notre méthodologie d'estimation des vitesses de parcours, nous avons proposé deux méthodes : directe et indirecte. La méthode directe est utilisée lorsque l'on dispose d'un nombre d'observations suffisant (nombre de passages) sur un tronçon routier dans une tranche horaire retenue dans notre étude. Sinon, en cas de manque d'observations, on applique des règles de décisions basées sur des facteurs temporels et des caractéristiques physiques du réseau routier.

Pour mettre en œuvre les deux méthodes, nous avons présenté un formalisme qui s'appuie sur un schéma conceptuel basé sur des types et des opérations abstraites de données. Etant donné que notre modèle des trajectoires est libre, il est alors indispensable d'utiliser les types abstraits **moving(point)**, **moving(int)**. Pour extraire les vitesses moyennes issues des trajectoires empruntées par le service d'urgence, nous avons utilisé les opérations **deftime**, **duration**, **at**, **speed**, **atperiods**, **min**, **decompose**, **ELEMENT** définies dans (Güting et al., 2000 ; Güting et al., 2005) et l'opérateur **mean** défini dans (Sandu-Popa et al., 2009).

Cependant, un formalisme d'enrichissement d'une base de données routière par des estimations de vitesses de parcours basé sur des TAD ne semble pas très utile pour le grand public et précisément pour les non-informaticiens. Pour ces raisons, notre idée était de faire le passage vers un formalisme basé sur un modèle conceptuel. Afin de bien mener cette traduction, nous avons présenté plusieurs modèles conceptuels. Parmi les modèles étudiés, le modèle MADS a été retenu. Il a été choisi pour les avantages suivants :

- la facilité et la clarté du modèle,
- l'orthogonalité entre les concepts du modèle,
- la possibilité d'attribuer des contraintes temporelles sur les associations des différentes entités du modèle.

Le deuxième et le troisième point seront indispensables pour pouvoir garantir la traduction de notre formalisme basé en TAD vers un formalisme qui s'appuie sur un modèle conceptuel. Pour assurer cette traduction, le modèle conceptuel a été enrichi par deux méthodes abstraites d'enrichissement : directe et indirecte.

Dans le but d'enrichir la base de données routière par des estimations de vitesses de parcours par le biais de la méthode directe, nous avons présenté quelques requêtes en sql faciles à mettre en œuvre. On voit bien la différence avec celles présentées dans le formalisme basé sur des TAD.

La méthode indirecte est basée sur l'application des règles de décisions incluant plusieurs facteurs tels que les tranches horaires retenues et quelques facteurs physiques du réseau routier. Afin de minimiser l'incertitude (écart-type) observée sur les vitesses moyennes issues de nos règles de décisions, nous avons proposé une méthodologie qui se décline en plusieurs étapes.

La première étape consiste à étudier la variation des vitesses en fonction de chaque facteur (tranches horaires et caractéristiques physiques du réseau routier). Seuls les facteurs qui ont un impact sur la variation de la vitesse seront retenus pour la deuxième étape de notre méthodologie. Nous précisons que les facteurs temporels ont été retenus comme facteurs de base de notre étude puisque le trafic dépend des différents moments de la journée.

La deuxième étape de notre méthodologie est réalisée en deux phases : la première consiste à chercher le facteur qui a une forte corrélation avec la vitesse observée. Dans la deuxième phase, nous étudions la corrélation entre le facteur retenu dans la première phase et le reste des facteurs. Seuls les facteurs ayant une faible corrélation entre eux sont retenus. Après avoir fixé les facteurs qui ont un impact sur la variation de la vitesse et qui sont peu corrélés entre eux, nous avons créé un arbre de décision basé sur les différents facteurs retenus.

Généralement, dans toute approche d'estimation de vitesses de parcours, l'étude de sa fiabilité est primordiale. Dans notre méthodologie, nous avons proposé deux méthodes d'évaluation : par méthode d'enrichissement directe et indirecte et par méthode globale.

Après avoir achevé le processus d'estimation du temps de parcours, nous nous sommes orientés vers le choix du type de graphe et du mode de recherche d'itinéraires le plus adapté à notre problématique. Le

type de graphe par intervalles et dépendant du temps a été retenu. D'une part, ce choix est justifié par le fait que les estimations du temps de parcours varient selon les tranches horaires retenues. D'autre part, notre idée était de prendre en considération l'incertitude observée sur les estimations du temps de parcours.

Concernant le moteur de recherche d'itinéraire de notre système, deux versions ont été implémentées : un seul et unique chemin (le plus rapide) et les k premiers chemins optimaux. Pour la deuxième version, on se limite à deux itinéraires les plus rapides dans un ordre croissant de temps de parcours. Nous estimons que cette version est très utile lorsque deux équipes de SMUR partent pour une même intervention.

Afin d'optimiser les itinéraires retournés par notre calculateur, il était nécessaire de prendre en considération tous les événements prévus ou imprévus qui peuvent influencer sur l'état normal du trafic. Pour cela, nous avons présenté dans le dernier chapitre de notre manuscrit une conception et une implémentation d'un système d'aide à la prise en compte de la perturbation du trafic en temps réel. De plus, le système sert aussi à détecter les incidents.

Dans notre étude, nous avons présenté tous les diagrammes et les éléments nécessaires pour la conception et l'implémentation de notre système. L'architecture générale de notre système se compose de cinq acteurs nommés « Mairie », « système de surveillance du trafic », « IGN », « Météo France » et « SMUR » ainsi que d'un composant qui sert de serveur de messagerie.

Les acteurs « Mairie » et « système de surveillance du trafic » seront nécessaires à la détection de tout événement exceptionnel prévu ou imprévu tels qu'une simple manifestation ou encore un incident. L'acteur « IGN » est très utile pour réaliser les mises à jour des caractéristiques du réseau routier. L'acteur « Météo France » sera utilisé pour tenir compte des conditions météorologiques dans l'estimation du temps de parcours. Enfin, l'acteur « SMUR » sert à calculer les itinéraires et à les retourner vers l'acteur « système de surveillance du trafic ». Cette action améliorerait le temps de parcours grâce à un opérateur du système de surveillance du trafic qui pourra commander à distance les feux tricolores ou les barrières automatiques localisés sur les itinéraires retournés par l'acteur « SMUR ».

Concernant le serveur de messagerie de notre système, son rôle est d'envoyer les informations issues des différents acteurs vers l'acteur « SMUR ».

Afin de rendre les poids des arcs de notre graphe déterministes, nous nous sommes inspirés des idées présentées dans (Hizem., 2008). Nous avons donc défini le degré d'optimisme δ qui sera utile pour modéliser l'impact des conditions météorologiques sur les estimations du temps de parcours.

Les perspectives de notre travail pourront être classées selon les étapes suivies dans notre méthodologie. Dans un premier temps, nous pouvons planifier l'amélioration de nos estimations du temps de parcours : pour la réalisation de cette tâche, nous récupérerons davantage de trajectoires d'interventions. Il serait alors possible d'appliquer notre méthode d'enrichissement directe sur un

grand nombre de tronçons routiers. La méthode d'enrichissement indirecte pourrait être améliorée par l'intégration d'autres facteurs comme ceux qui sont liés aux caractéristiques physiques des tronçons routiers (nombre d'entrées et de sorties, nombre d'intersections, présence d'une bande d'arrêt d'urgence et sens de la circulation), à leurs localisations géographiques (zone urbaine ou pas) et aux conditions météorologiques (beau temps, pluvieux et neigeux). Nous intégrerons directement les nouvelles caractéristiques physiques des tronçons routiers et leurs localisations géographiques dans l'étape numéro 2 de notre méthodologie de la prédiction de vitesses de parcours (figure 42, page 84). Pour les classes liées aux conditions météorologiques, il serait possible de les intégrer dans la phase de la création des arbres de décisions (étape numéro 3 de la méthodologie de la prédiction du temps de parcours). Si on constate que les conditions météorologiques ont une importance dans les règles de décision, nous pourrions modifier l'action de l'acteur « Météo France » dans notre système. Au lieu d'appliquer le degré d'optimisme δ , nous pourrions appliquer les règles de décisions intégrant les conditions météorologiques.

Concernant la mise en place de notre système d'aide à la prise en compte des perturbations du trafic et la détection des incidents en temps réel, l'activation des acteurs « Mairie », « IGN », et « Météo France » pourra être réalisée par le biais d'un simple accord administratif. Nous fixerons pour chacun les types d'informations et les formats des messages à envoyer à l'acteur « SMUR ». L'activation de l'acteur « système de surveillance du trafic » est liée à l'installation des caméras sur notre zone d'étude et à la création d'un centre de contrôle pour assurer l'interaction avec notre système.

Les actions provoquées par l'acteur « Mairie » engendrent une modification (blocage total, partielle ou autre) d'un ou de plusieurs tronçons routiers durant un intervalle de temps. Un blocage serait par exemple susceptible de perturber l'état du trafic sur l'entourage du ou des tronçons concernés. Afin de pouvoir prendre en considération ce type de perturbation, nous pourrions étudier les répercussions du trafic sur le réseau environnant.

D'après (Nguyen, 2010), suite au blocage d'un tronçon routier causé par des travaux publics, la majorité de la population utilise la déviation mise en place. En revanche, les gens qui connaissent bien le terrain empruntent d'autres itinéraires. Généralement, les paramètres pris en compte dans le choix d'un itinéraire peuvent être classés selon les caractéristiques physiques du réseau routier (temps de parcours, limitation de vitesse, nombre d'intersections et sécurité), la connaissance du réseau routier (densité, degré de congestion), le contexte du déplacement (travail, voyage) et les facteurs liés au voyageur (âge, sexe, éducation et profession). Cependant, le comportement humain ne peut être modélisé d'une manière exacte. Afin de résoudre ce type de problème, nous pourrions nous limiter dans notre étude à un seul facteur lié au temps de parcours. Pour la réalisation de cette étude, il serait possible de suivre la démarche suivante.

La première étape consiste à récupérer les k plus rapides chemins dont les points de départ et d'arrivée correspondent aux points de départ et d'arrivée du tronçon bloqué. Le premier chemin représente la déviation mise en place par la mairie. Les autres chemins seront les itinéraires les plus rapides dans un ordre décroissant. Dans la suite de notre étude, on se limitera à trois itinéraires.

- Dans la deuxième étape, nous répartirons le trafic du tronçon bloqué sur les trois chemins. Pour cela, on utilisera l'équation suivante :

$$\text{nouveau trafic} = (\text{ancien trafic}) + (\text{pourcentage} * \text{ancien trafic})$$

Chaque itinéraire recevra un pourcentage du trafic du tronçon bloqué. Ce pourcentage pourra être fixé par ordre décroissant selon les k plus rapides chemins. Par exemple, 75% du trafic du tronçon bloqué sera réparti sur l'itinéraire proposé par la mairie, 15% sur le deuxième et 10% sur le troisième itinéraire.

- Dans la troisième étape, nous étudierons la relation entre le trafic et la vitesse observée sur un nombre significatif de tronçons routiers. Cette étude nous permettra de convertir le supplément ou la diminution de trafic en variation de vitesse. Par conséquent, on pourra estimer de nouveau le temps de parcours et son incertitude pour les trois itinéraires.

- Enfin, une fois que l'événement exceptionnel est achevé, on rétablira les temps de parcours initiaux pour les trois itinéraires.

Concernant la perspective liée au choix du meilleur itinéraire, nous proposons d'intégrer le critère lié à l'incertitude des estimations du temps de parcours dans le choix du meilleur itinéraire. On précise dans ce cas qu'il n'est pas possible d'utiliser le mode multicritère. Ceci est justifié par le fait que les deux critères à étudier (temps de parcours moyen et incertitude) sont dépendants dans notre contexte. Pour résoudre ce problème, il serait envisageable de suivre la démarche suivante. Dans un premier temps, on calculera par exemple les 3 plus rapides chemins. Ensuite, on stockera pour chacun l'incertitude résultante obtenue par la somme quadratique des incertitudes respectives sur les tronçons routiers empruntés. Dans un deuxième temps, il est possible de choisir comme itinéraire celui qui a l'incertitude la plus faible.

Enfin, la dernière perspective de notre travail concerne l'amélioration de la lisibilité de la carte de la navigation intégrée dans notre calculateur d'itinéraire. Ce type d'amélioration favoriserait la compréhension rapide des objets cartographiques de la carte dont le chemin retourné par notre moteur de recherche d'itinéraire. Le délai d'une intervention pourrait alors être réduit. Afin d'avoir une meilleure lisibilité de notre carte, nous pourrions utiliser l'outil développé par (Bessadok et al., 2012).

Bibliographie

Adlakha V G., « An improved conditional Monte Carlo technique for stochastic shortest route problem ». *Management Science*, vol 32, n°10, pages1360-1367, 1986.

Alt H., Efrat A., Rote G., Wenk C., « Matching planar maps », *Journal of Algorithms*, vol 49, n°2, p. 262–283, 2003.

Andreatta G., Ricaldone F., Romeo L., « Exploring stochastic shortest path problems ». *Rapport Technique, ATTI Giornale di Lavarò*, 1985

Baccini A., « Statistique Descriptive élémentaire ». *Institut de Mathématique de Toulouse, université de Paul Sabatier*, 2010.

Badard T., « Propagation des mises à jour dans les bases de données géographiques multi représentations par analyse des changements géographiques ». *Thèse de Doctorat, Université Marne-la-Vallée*, 2000.

Bedard Y., « Visual Modeling of Spatial Databases Towards Spatial Extensions and UML ». *Geomatica, Vol 53, n°2* , 169-186, 1999.

Bel Hadj A., « Qualité géométrique des entités géographiques surfaciques - Application à l'appariement et définition d'une typologie des écarts géométriques ». *Thèse de Doctorat, Université Marne-la-Vallée*, 2001.

Bessadok F., Dominguès C., Ruas A., « Evaluation et amélioration automatiques de la lisibilité des cartes sur écran ». *Journées de la Recherche IGN, 11 mars, Saint-Mandé (France)*, 2012.

Bousquet A., « Optimisation d'itinéraires multimodaux fondée sur les temps de parcours à l'échelle d'une agglomération urbaine dense ». *Thèse doctorat de l'école Nationale des travaux publics de l'état*, 2010.

Brakatsoulas S., Pfooser D., Salas R., Wenk C., « On Map-Matching Vehicle Tracking Data ». VLDB Journal, p.853-864, 2005.

Brotcorne L., Farand L., Laporte G., Semet F., « impacts des nouvelles technologies de l'information sur la gestion des systèmes de véhicules d'urgence ». Revue transdisciplinaire en santé, vol 6 n°2, p.149-168, 1999.

Cete méditerranée., « cartographie numérique, données routières, SIG et map- matching ». Opération de recherche LCPC n° 11G011, 17 janvier 2005.

Certu., « Les temps de parcours : Estimation, diffusion et approche multimodale ». Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, 2008.

Chen P.P ., « The Entity Relationship Model - Towards a Unified View of Data». ACM Transactions on Database Systems, vol 1, n°1, p. 9-36, 1976

Cohen S., « Détection, alerte rapide et traitements des incidents routiers ». Second Carrefour Predit, p.418-422, 1999.

Danech-Pajouh M., Joubert P., Blondeau F., « Temps de parcours de préférence, Conventions PREDIM/INRETS ». 2007.

Danyel F., « Social Networks for End Users ». Thèse de doctorat, University of California Irvine, 2003.

Danyel F., Joshua O., « Jung : the java universal networks/ graph api ». UCI ISR poster session, 2004.

Daskin M.L., « A maximum expected covering location model: Formulation, properties, and heuristic solution ». Transportation Science vol 17, p.48-70, 1983.

Daskin M.S., « The Maximal Expected Covering Location Model: Formulation, Properties and Heuristic Solution ». Transportation Science p.48-70, 1983.

Dreyfus S., « An appraisal of some shortest-path algorithms ». *Operations Research*, Vol 17, n°3, p.395-412.

Dumas M., : « une plate-forme pour le développement d'applications temporelles au dessus de SGBD à objets ». Thèse de doctorat de l'université Joseph-Fourier, 2000.

Erwing M., Güting R.H., Schneider M., Vazirgiannis M., « Spatio-Temporel Data Types: An approach to Modeling and Querying Moving Objects in Databases » *Geoinformatica*, p.269-296, 1999.

Faouzi EL., Lesort J.B., « Fusion de données pour l'estimation du temps de parcours. Réflexions théoriques et méthodologies ». Rapport LCIT, n°101, 2001.

Fhwa., « Freeway Management and Operations Handbook ». Rapport FHWA, Washington, 2003.

Fowler M., Scott K., « UML Distilled-Applying the Standard Object Modeling Language ». Addison-Wesley, ISBN 0-201-65783-X, 1998.

Frank.H., « Shortest paths in probabilistic graphs ». *Operations Research*, vol 17, p.583-599,1969.

Gayte O., Libourel T., Cheylan J., Lardon, S., « Conception des Systèmes d'information sur environnement ». Paris: Hermés, 1997.

Gendre P., Ostyn G., « Expérimentation d'un prototype de base de données du temps de parcours par GPS ». CETE méditerranée, 2007.

Gendreau M., Laporte G., Semet F., « Solving an ambulance location Model by Tabu Search ». *Location Science*, p.75-88. 1997.

Gondran M., Minoux M., « Graphes, Dioïdes et semi-anneaux ». Editeur TEC & DOC Lavoisier, 2002.

Grabener T « Calcul d'itinéraire multimodal et multiobjectif en milieu urbain ». Thèse de doctorat spécialité informatique. Université Toulouse 1 Capitole.

Güting R.H., Almeida V.T., « Modeling and querying moving objects in networks ». The VLDB Journal, vol 15, n°2, p 165-190, 2006.

Güting R.H., Böhlen M.H., Erwig M., Jensen C.S., Lorentzos N.A., Schneider M., Vazirgiannis M., « A Foundation for Representing and Querying Moving Objects ». ACM Transactions on Database Systems, vol 25, n°1, p.1-42, 2000.

Güting R.H., Schneider M., Moving Objects Database, Morgan Kaufmann Publishers, 2005.

Han J., Kamber M., « Data Mining Concepts and Techniques ». Morgan Kaufmann Publishers, 2001.

Hasse.K., « Java Message Service API Tutorial », 2002. Réf du site www.cse.buffalo.edu.

Herring J. R., « OpenGIS Implementation Specification for Geographic ». OGC, 2006.

Hizem M. M., « Recherche de chemins dans un graphe à pondération dynamique : application à l'optimisation d'itinéraires dans les réseaux routiers ». Thèse de doctorat à l'école centrale de Lille, 2008.

Kakoudakis I., « The TAU Temporel Object Model ». MPhil Thesis, UMIST, Departement of Computation, 1996.

Kalboussi A., « Méthode d'analyse et de classification des segments du réseau routier supérieur de la région de Montréal ». Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maitrise des sciences appliquées. Ecole polytechnique de Montréal, 2010.

Kamburowski J., « A note on the Stochastic Shortest Route Problem ». Operations Research, vol 33,n°6, p 696- 698, 1985.

Kosters G., Pagel B., Six H., « GIS-Application Development with GeoOOA ». International Journal of Geographical Information Science , vol. 11, n°4, p. 307-335, 1997.

Liu K., Morikawa T., « Feasibility of using taxi dispatch system as probes for collecting traffic information ». Journal of Intelligent Transportation Systems, p.16-27, 2009.

Loustau P., Morency C., Trépanier M., Gourvil L., « Portrait de la fiabilité des temps de parcours sur le réseau autoroutier montréalais », 2009. Site internet www.aqtr.qc.ca.

Martins E.Q.V., « On a multicriteria shortest path problem ». European Journal of Operational Research, vol n°16, p.236-245,1984.

Mermet E., « Aide à l'exploration des propriétés structurelles d'un réseau de transport. Conception d'un modèle pour l'analyse, la visualisation et l'exploration d'un réseau de transport ». Thèse de doctorat à l'Université Paris-Est, 2011.

Michaud M., « ShortestPath Plugin for jump- Free », 2006.

Minout M., « Modélisation des Aspects Temporels dans les Bases de Données Spatiales ». Thèse de doctorat : université libre de Bruxelles, 2007.

Miralles A., « Ingénierie des modèles pour les applications environnementales ». Thèse de doctorat: université de Montpellier 2005.

Miro., « Analyse des temps de parcours sur le réseau routier de la grande région de Montréal : rapport final, projet n° Q94231 ». Ministère des transports du Québec, 2006.

Mustière S., Devogele T., « Matching networks with different levels of detail ». GeoInformatica, vol 12 , 2008.

Nesamani K. S., Chu L.Y., MacNally M.G., Jayakrishnan R., « Estimation of Vehicular Emissions by Capturing Traffic Variations », 2005.

Nguyen T., « Conception et application d'un modèle de l'information routière et ses effets sur le trafic ». Thèse de doctorat spécialité Transport, Université de Paris-Est, 2010.

Olteanu A.M., « Fusion de connaissances imparfaites pour l'appariement de données géographiques Proposition d'une approche s'appuyant sur la théorie des fonctions de croyance ». Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est, 2008.

Orda A., Rom R., « Minimum weight paths in time-dependent networks ». *An International Journal Networks*, vol 21, n°3, p.295-319, 1990.

Parent C., Spaccapietra S., Zimanyi E. « Conceptual Modeling for Traditional and Spatio-Temporal Applications: The MADS Approach ». Springer-Verlag, 2006.

Parent C., Spaccapietra S., Zimanyi E., Donini, P., Plazanet, C., Vangenot, C., et al. « MADS, modèle conceptuel spatio-temporel ». *Revue internationale de Géomatique*, p 159-186, 1997.

Pelekis N., « STAU : ASpatio-temporel Extension to ORACLE DBMS ». PHD Thesis, UMIST, Departement of Computation, 2002.

Pelekis N, Theodoridis Y., « An oracle Data Cartridge for Moving Objects. » UNIPi-ISL-TR-2007-04, Technical Report Series, Information Systems Lab, University of Piraeus, Greece, December 2007.

Pelekis N., Theodoridis Y., Vosinakis S., Panayiotopoulos T., « Hermes - A Framework for location data based Management » Proc. 10th Int'l Conference on extending Database Technology (EDBT) Germany 2006.

Pfoser D., Jensen C.S., « Indexing of Network-constrained Moving Objects ». *ACM-GIS*, p.25-32, 2003.

Pinet F., « Modélisation des contraintes d'intégrité dans les systèmes d'information environnementaux ». Habilitation à diriger les recherches, 2010

Price R., Tryfona N., Jensen C., « Extended SpatioTemporal UML: Motivations, Requirements and Constructs ». *Journal on Database Management, Special Issue on UML*, vol 11, n°4, p.14-27, 2000.

Quinlan J. R., « Programme for Machine Learning ». Morgan Kaufman, USA, 1993.

Repede J.F., Bernadro J.J., « Developing and validating a Decision Support System for Locating Emergency Medical vehicles in Louisville, Kentucky ». *European Journal of operational Research*, p.567- 581, 1994.

Revelle C.S., Eiselt H.A., « Location analysis : A synthesis and survey ». *European Journal of operational research*, vol 165, p.1-19, 2005.

Rocha L., Edelweiss N., Iochpe C. « GeoFrame-T: A Temporal Conceptual Framework for Data modeling ». 9th ACM international symposium on Advances in geographic information systems, (pp. 124-129). Atlanta, Georgia (USA), 2001.

Romon S., « Véhicules traceurs comme outil de vérification d'un algorithme de calcul de temps de parcours ». Séminaire véhicules traceurs 10 décembre 2010.

Rumbaugh J., Blaha M., Premerlani W., Eddy F., Lorensen W., « Object oriented modeling and design ». Prentice Hall, 1991.

Sandu-Popa I., Kharrat A., Zeitouni K., Saint-Pierre G., « Base de données de capteurs à localisation mobile – Modèle et langage, dans *Systèmes d'Information et géolocalisation* ». RSTI – Série ISI (Ingénierie des Systèmes d'Information), Editions Hermes-Lavoisier, vol 14, n°5, 2009.

Sauvanet G., « Recherche de chemins multiobjectifs pour la conception et la réalisation d'une centrale de mobilité destinée aux cyclistes ». Thèse de doctorat à l'université François Rabelais – Tours, 2011.

Savas E. S., « Simulation and Cost-Effectiveness Analysis of New York's Emergency Ambulance Service ». *Management Science*, vol 15, n° 12, p. 608-627, 1969.

Schaefer R. P., Thiessenhusen K. U., Wagner P., « A traffic information system by means of real time floating car data ». In Proceedings of the 9th World Congress on ITS, Chicago, 2002.

Secourisme-pratique., « Les secours en France mode d'emploi ». Site internet : www.secourisme-pratique.com, 2005.

Sfmu., (Société Française de Médecine d'Urgence). « Les français et l'accès aux soins urgents non programmés ». 2ème congrès de la SFMU, Paris, juin 2008.

Sigal C E., Pritsker A.A.B., Solberg J.J., « Stochastic shortest route problem ». Operations Research, vol 28, n°5, p.1122-1129, 1980.

Sua S., Shihb C.L., « Modeling an emergency medical services system using computer Simulation ». International Journal of Medical Informatics vol 72, p.57-72, 2003.

Suleman B., « Représentation et interrogation de données spatio-temporelles : Cas d'étude sur PostgreSQL/PostGis », 2009.

Tardieu H., Rochfeld A., Coletti R., « La méthode Merise. Principes et outils ». Edition d'organisation, 1986.

Tryfona N., Jensen C., « Conceptual data modeling for spatiotemporal applications ». GeoInformatica, p.245-268, 1999.

Uno N., Kurauchi F., Tamura H., Iida Y., « Using bus probe data for analysis of travel time variability ». Journal of Intelligent Transportation Systems, vol 13, n°1, p.2-15, 2009.

Whitney H., « Congruent graphs and the connectivity of graphs ». American Journal of Mathematics, vol 54, p.150-168, 1932.

Yen J.Y., « Finding the k shortest loopless paths en a network ». *Management Science*, vol 17, p.712-716, 1971.

Zaki C., Zekri E., Servières M., Moreau G., Hégron G., « Urban Spatiotemporal Data Modeling: Application to the Study of Pedestrian Walkways ». *Advances in Intel. Decision Technologies, SIST 4*, p.549-558, 2010.

Zaki S., « Modélisation spatio-temporelle multi-échelle des données dans un SIG urbain ». Thèse doctorat, école centrale de Nantes 2011.

Zheni D., Frihida A., Ben Ghezala H., Claramunt C., « Modèle et langage pour la manipulation de trajectoires spatio-temporelles ». *Revue internationale de géomatique*, vol.20, n°1, 20, p. 37-64, 2010.

Zimanyi E., Minout M., « Implementing conceptual spatio-temporal schemas in object-relational DBMSs. ». In *Proceedings of the On the Move to Meaningful Internet Systems 2006: OTM Workshops*, number 4278 in LNCS, p1648-1657, Montpellier, France, October 2006. Springer Verlag.

ANNEXE A IMPLEMENTATION DU CALCULATEUR D'ITINERAIRE

Dans cette annexe, nous présentons quelques captures d'écrans de notre application de calcul d'itinéraires. Nous précisons que le moteur de recherche d'itinéraires a été intégré dans le SIG libre « open-jump ».

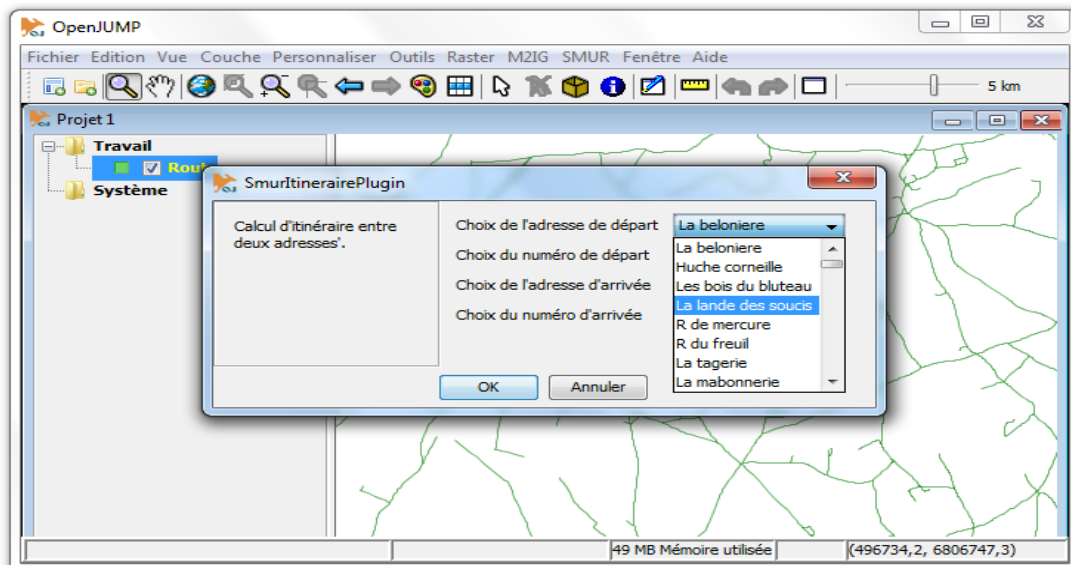


Figure 136 Capture d'écran pour la saisie de l'adresse de départ et d'arrivé

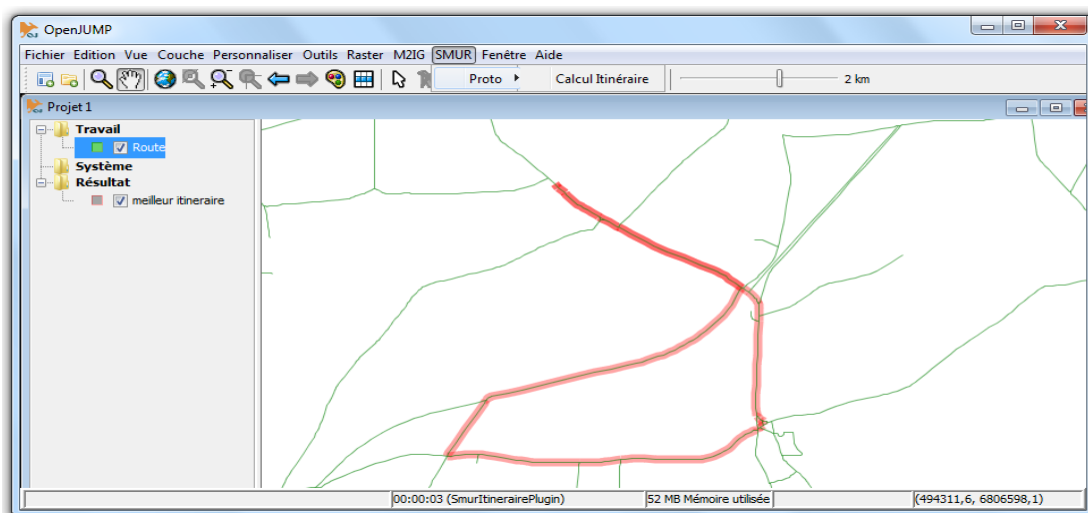


Figure 137 Capture d'écran des deux itinéraires retournés par le moteur de recherche d'itinéraires

Une fois que le moteur de recherche retourne les deux itinéraires, il est possible de les enregistrer sous plusieurs formats. Cette fonction est très nécessaire lors de l'envoi des informations de l'acteur SMUR vers l'acteur « système de surveillance du trafic en temps réel ».

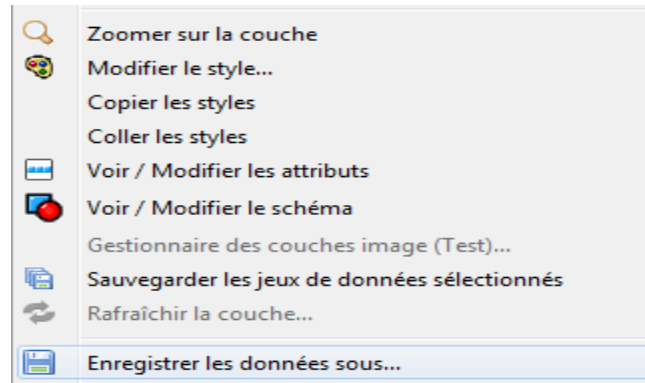


Figure 138 Capture d'écran pour la sauvegarde des itinéraires

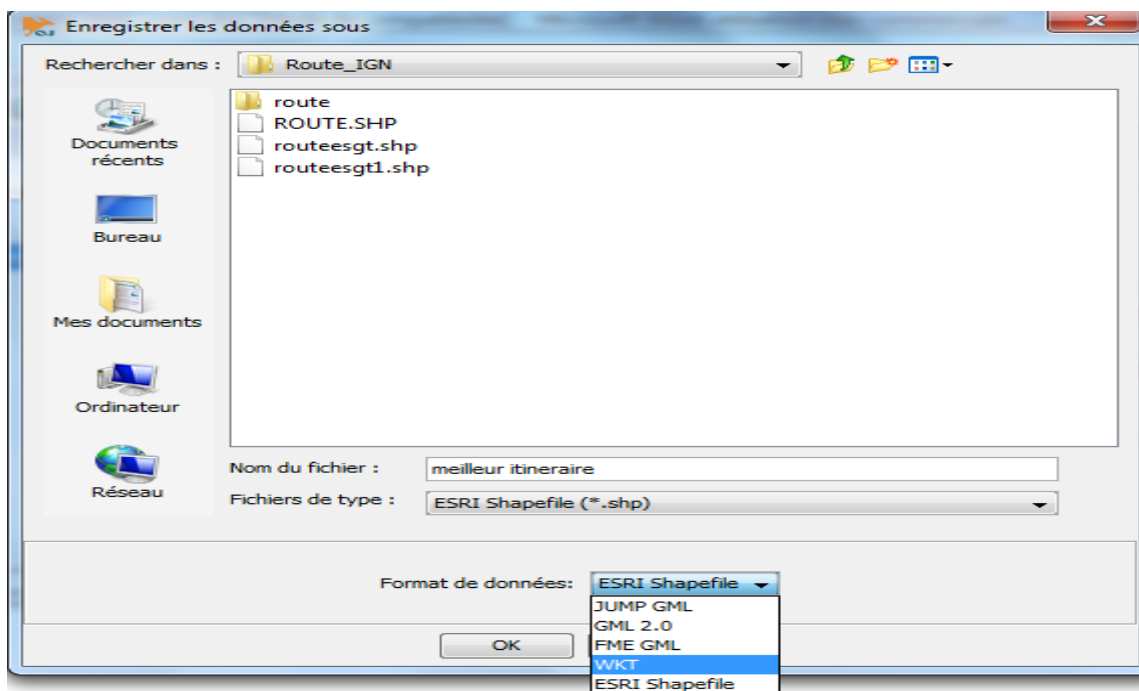


Figure 139 Capture d'écran pour le choix de formats de sauvegarde des itinéraires

ANNEXE B UN EXEMPLE DE SIMULATION DE L'ACTEUR

MAIRIE

Dans l'annexe B, on présente quelques imprimés d'écrans de l'application « Mairie ». Un agent pourra lancer des événements prévus comme le blocage total d'un ou plusieurs tronçons routiers suite à des travaux publics ou autre type d'événements. Pour cela, deux étapes peuvent être envisagées :

- 1) Sélectionner le nom de la rue à barrer,
- 2) Faire la saisie de la date, l'heure du début et de la fin de l'événement.

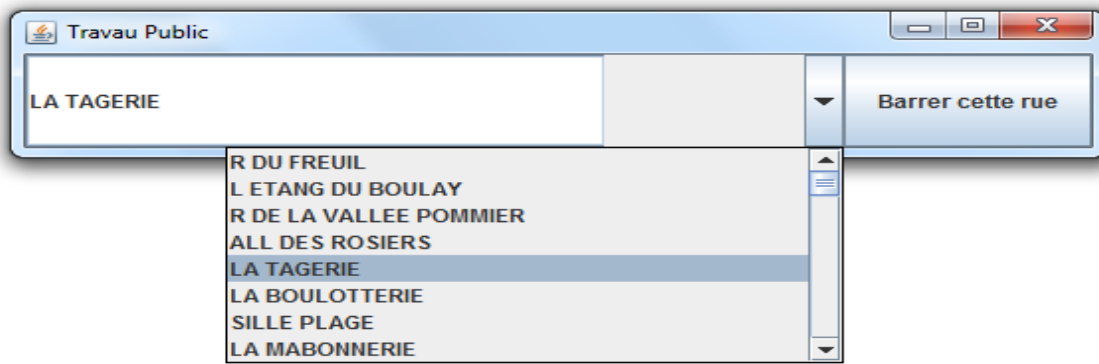


Figure 140 Sélection d'une rue à barrer

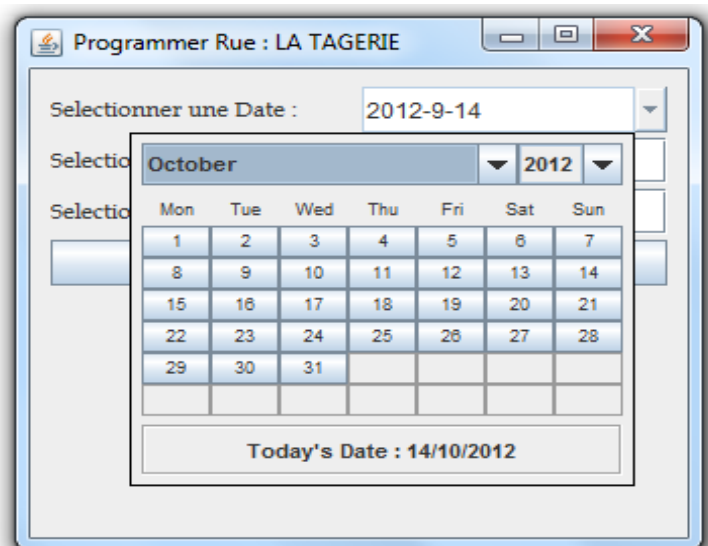


Figure 141 Saisie de la date de l'événement

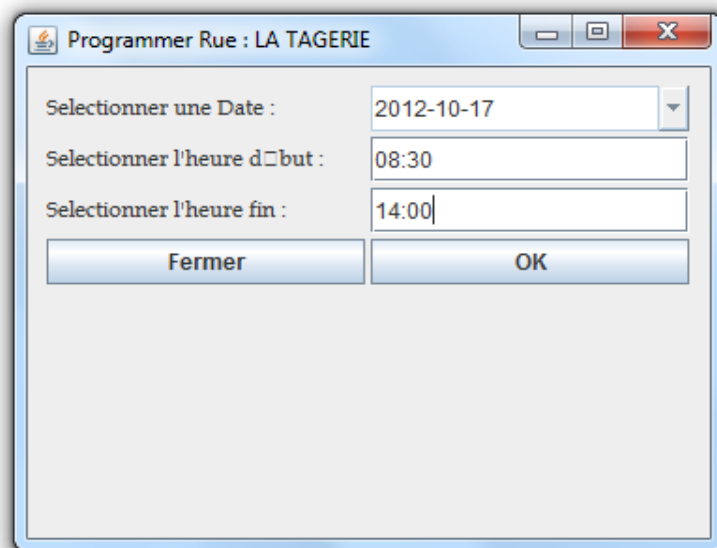


Figure 142 Saisie de l'heure du début et de la fin de l'événement

De plus, nous avons testé localement les autres types de messages issus des acteurs, « système de surveillance du trafic en temps réel », « IGN », et « Météo France ».