

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN OUTAOUAIS

GESTION ADAPTATIVE DES VÉHICULES
D'URGENCE UTILISANT DES INFORMATIONS
EN TEMPS RÉEL

MÉMOIRE DE MAÎTRISE
PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INFORMATIQUE

PAR :
HANENE BEN YEDDER

Mai 2014

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN OUTAOUAIS

Département d'informatique et d'ingénierie

Mémoire:

GESTION ADAPTATIVE DES VÉHICULES
D'URGENCE UTILISANT DES INFORMATIONS
EN TEMPS RÉEL

Présenté par : Hanene Ben Yedder

Pour l'obtention de maîtrise en Informatique

Mai 2014

Évalué par un jury composé de :

Ilham Benyahia.....Directrice de recherche

Jean-Yves Potvin.....Co-directeur de recherche

Luigi Logrippo.....Président du Jury

Ana-Maria Cretu.....Membre du Jury

Remerciement

Tout d'abord, je remercie Allah pour la patience, la force, la volonté et la santé qu'Il m'a données afin de réaliser ce travail.

Mes chaleureux remerciements s'adressent à ma directrice de recherche Dr. Ilham Benyahia pour son soutien, ses directives, ses conseils et le temps qu'elle a bien voulu me consacrer.

Mes vifs remerciements s'adressent également à mon co-directeur de recherche Dr. Jean-Yves Potvin, pour sa précieuse contribution, ses conseils et son aide, et à Dr Luigi Logrippo pour son aide, ses conseils et ses encouragements continus.

Un grand merci à mon mari, mes parents, ma petite Salsabil, ma sœur et toute ma famille pour leurs soutiens moraux, leurs encouragements et leurs sacrifices tout le long de ma formation.

Je tiens aussi à rendre hommage à ceux qui ont cru en mes capacités malgré les courants contraires qui ont tout fait pour m'arrêter. Pour cela, je tiens à remercier particulièrement mes parents pour leur présence constante et leur aide indispensable ainsi que pour leur amour inestimable.

Je remercie tous ceux qui m'ont aidé à franchir ce cap malgré toutes les difficultés de la vie courante.

À tous ceux qui ont été présents de près et de loin, je tiens à dédier ce mémoire.

Table des matières

Remerciement.....	i
Résumé	i
Abstract.....	i
Introduction	1
Chapitre 1 : Contexte et problématique	3
1. Contexte.....	3
1.1. Incident et impacts.....	3
1.2. La gestion des incidents	4
2. Aperçu sur les travaux existants relatifs à la gestion des incidents.....	5
2.1. Méthodes de calcul du délai	5
2.2. Détection de l'incident.....	6
2.3. Durée totale de l'incident	7
3. Problématique de la répartition des véhicules d'urgence	9
3.1. Exemples de scénarios de congestion imprévisible.....	11
3.2. Potentialité de la gestion en temps réel	13
3.3. Besoins apparents de la gestion en temps réel	15
4. Objectif de la recherche	16
Chapitre 2: État de l'art.....	18
1. Introduction au problème de routage et répartition de véhicules.....	19
1.1. Variantes du problème de tournées de véhicules	20
1.2. Problème de répartition de véhicules d'urgence en temps réel	21
2. Un aperçu des contributions portant sur les systèmes d'urgence	22
2.1. Problème de répartition avec temps de parcours statique	23
2.2. Problème de répartition dynamique	24
3. Architecture de gestion des flottes de véhicules.....	28
3.1. Architecture centralisée.....	28
3.2. Architecture décentralisée.....	29
3.3. Architecture hybride	30
3.4. Architecture reconfigurable	32

4.	Approches de résolution pour le VRP	33
4.1.	Un aperçu sur le principe de base des méthodes de résolution	33
4.2.	Un aperçu sur l'optimisation dynamique.....	34
4.3.	Approches de résolution utilisées dans la littérature	36
5.	Le problème du plus court chemin dynamique	40
5.1.	Les algorithmes du plus court chemin	40
5.2.	Les modèles de prévision du temps de parcours.....	42
6.	Conclusion des discussions sur les approches existantes.....	43
Chapitre 3 : Méthodologie.....		46
1.	Construction de la solution.....	46
1.1.	Modélisation du système de gestion des véhicules d'urgence.....	46
1.2.	Identification des principaux événements.....	47
1.3.	Définition d'approche de reconfiguration réduisant l'impact des variations.....	48
1.4.	Maximisation de l'utilisation de la flotte de véhicules	49
2.	Approche de résolution	50
2.1.	Architecture de résolution	50
2.2.	Méthodologie décisionnelle	53
2.3.	Modélisation de la structure décisionnelle.....	57
2.4.	Séquence décisionnelle :.....	70
3.	Conclusion.....	71
Chapitre 4 : Simulation et résultats		72
1.	Introduction	72
2.	Environnement de simulation.....	72
2.1.	Modèle de simulation	73
2.2.	Outils de simulation SUMO	73
2.3.	Environnement connecté.....	74
2.4.	Paramètres d'entrée de la simulation	79
2.5.	Collecte, agrégation et contrôle des données	81
2.6.	Hypothèses de simulation.....	84
2.7.	Indice de performance utilisé	86
3.	Expérimentation et résultats	86
3.1.	Scénario de congestion en route	87

3.2. Scénario d'un véhicule en panne	92
3.3. Analyse des résultats	98
Conclusion, Contributions et Travaux futurs	101
1. Conclusion.....	101
2. Travaux futurs	103
Références	104
Annexe 1: Voisinage dynamique.....	112
Annexe 2 : Algorithmes du plus court chemin.....	114

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1-1 COMPOSANTES DE LA DUREE D'UN INCIDENT (MADANAT ET FEROZE [16])	8
FIGURE 1-2 UNE COLLISION ENTRE DEUX VOITURES SUR LA ROUTE DU VEHICULE D'URGENCE	11
FIGURE 1-3 CHUTE D'UN ARBRE SUR LA ROUTE DU VEHICULE D'URGENCE	12
FIGURE 2-1 STRUCTURE DU SYSTEME DE GESTION DE VEHICULES D'URGENCE (HAGHANI <i>ET AL.</i> [9])	27
FIGURE 2-2 ARCHITECTURE MULTI-AGENT POUR LA GESTION DE VEHICULES D'URGENCE (IBRI <i>ET AL.</i> [42])	31
FIGURE 2-3 MODELISATION D'UNE RESOLUTION PERIODIQUE DU PROBLEME DE ROUTAGE TEMPS REEL [19]	35
FIGURE 3-1 CONCEPT DE VEHICULES CONNECTES VANet	47
FIGURE 3-2 ARCHITECTURE D'APPLICATION COMPLEXE (BENYAHIA ET POTVIN [33])	51
FIGURE 3-3 LES INTERACTIONS ENTRE LES TROIS COUCHES	53
FIGURE 3-4 DIAGRAMME DE COLLABORATION DU SYSTEME DE GESTION DES VEHICULES	57
FIGURE 3-5 SCENARIO D'EXECUTION POUR NOTIFICATION FORTE CONGESTION SUR LA ROUTE	60
FIGURE 3-6 SCENARIO D'EXECUTION POUR NOTIFICATION DE VEHICULE COINCE PAR UNE CONGESTION	62
FIGURE 3-7 SCENARIO D'EXECUTION DE NOTIFICATION D'UN VEHICULE EN PANNE	64
FIGURE 3-8 EXEMPLE D'UN SOUS-RESEAU DE GRADE-2 EN FONCTION DU CHEMIN P (JIGANG <i>ET AL.</i> [77])	68
FIGURE 3-9 ARCHITECTURE AVEC DES COMPOSANTS RECONFIGURABLES (INSPIREE DE [33])	70
FIGURE 4-1 ENVIRONNEMENT D'EXPERIMENTATION	75
FIGURE 4-2 FICHIERS DE CONFIGURATION DE LA CIRCULATION URBAINE	76
FIGURE 4-3 FRAMEWORK DE SIMULATION	79
FIGURE 4-4 LOCALISATION GEOGRAPHIQUE INITIALE DES VEHICULES D'URGENCE	81
FIGURE 4-5 ROUTE PLANIFIEE INITIALEMENT AU VEHICULE D'URGENCE EV2	87
FIGURE 4-6 CAMION EN PANNE SUR LA ROUTE DU VEHICULE D'URGENCE (PRISE DE SUMO)	88
FIGURE 4-7 DEROULEMENT DU SCENARIO 1	89
FIGURE 4-8 NOUVELLE ROUTE DU VEHICULE EV2	90
FIGURE 4-9 VEHICULE D'URGENCE EN PANNE A MI-CHEMIN (PRISE DE SUMO)	93
FIGURE 4-10 ROUTE POTENTIELLE DU VEHICULE EV3 VERS LE SITE D'APPEL D'URGENCE	94
FIGURE 4-11 ROUTE POTENTIELLE DU VEHICULE EV5 VERS LE SITE D'APPEL D'URGENCE	95
FIGURE 4-12 DEROULEMENT DU SCENARIO 2	96

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1- PROBLEMES LOCAUX DE ROUTAGE ET REPARTITION DYNAMIQUES (GENDREAU ET POTVIN, [30])	21
TABLEAU 2- TABLEAU COMPARATIF DES DIFFERENTES APPROCHES.....	45
TABLEAU 3- BASE DES REGLES.....	71
TABLEAU 4- ÉTAT INITIAL DE LA FLOTTE DE VEHICULES D'URGENCE	81
TABLEAU 5- CLASSIFICATION DE L'ÉTAT DU TRAFIC ROUTIER SELON LES VITESSES DE CIRCULATION [89].....	83
TABLEAU 6- TEMPS EPARGNE PAR LE REROUTAGE D'EV2 PAR LE SYSTEME DE GESTION ADAPTATIF.....	91
TABLEAU 7- VARIATION DU TEMPS EPARGNE AVEC L'AMPLEUR DE LA CONGESTION.....	92
TABLEAU 8- CARACTERISTIQUES DES ROUTES DES VEHICULES CANDIDATS	95
TABLEAU 9- RESULTATS DE SIMULATION DU SCENARIO 2.....	97

Résumé

Les systèmes de transports intelligents (STI) représentent un domaine multidisciplinaire combinant des technologies émergentes dans le but d'optimiser les planifications et opérations des réseaux de transports. Nous considérons particulièrement les STI pour l'étude des problèmes de recherche liés à la gestion des incidents dont la résolution présente encore des défis et des difficultés. Comme axe de recherche, nous considérons le problème de répartition dynamique des véhicules d'urgence vu ses retombées. En effet, l'efficacité du processus de gestion des véhicules d'urgence permet de minimiser les conséquences des incidents sur les vies humaines, les biens matériels ainsi que le rétablissement de la fluidité et de la performance du réseau routier. La prise de décision dans ces situations d'urgence demeure une tâche difficile, vu le nombre de variables qui entrent en jeu d'une part et le dynamisme et l'imprévisibilité de certains d'entre eux d'autre part. La littérature montre de nombreuses contributions relatives aux études de ce problème notamment la définition d'algorithmes d'optimisation basés sur des méta-heuristiques de plus en plus sophistiquées et leurs combinaisons. Cependant, la plupart des recherches dans ce domaine ont porté sur la relocalisation dynamique des véhicules de façon à tenir compte du dynamisme des arrivées des appels tout en négligeant les répercussions des incertitudes de l'environnement routier sur les solutions. L'intégration d'une telle problématique dans le contexte des transports représente une innovation qui nous permet de considérer de nouveaux formalismes de ces problèmes et qui permettent d'étudier le problème dans un contexte dynamique et interactif. Dans ce contexte, les changements dynamiques et imprévisibles de l'environnement pourraient être mieux adressés. Nous proposons une approche réactive pour l'affectation des véhicules d'urgence basée sur une résolution contextuelle et une architecture basée sur des composantes dynamiquement reconfigurables. Pour expérimenter et valider notre approche, nous avons défini un cadre de simulation conçu pour mieux supporter notre étude. Nous avons défini et testé plusieurs scénarios réalistes. Les résultats numériques mettent en évidence l'avantage de notre approche de répartition proposée pour l'optimisation du temps de réponse définie par la réduction des délais d'intervention.

Mots clés: affectation dynamique de véhicules, approche contextuelle, architecture reconfigurable, véhicules d'urgence, système de transports intelligents, simulation.

Abstract

Decision making in urban emergency situations is a challenging task since there are several variables influencing the process, and some of them change unpredictably. Emergency situations require accurate and timely decisions in order to reduce delay and additional impact of incidents on human lives and civil property. This process characteristic requires that decision makers monitor and adjust their decisions almost permanently. Therefore, information availability and exchange are key to improve the decision making process. Despite sophisticated optimization contributions in dynamic emergency vehicle dispatching problem, few of them have considered their integration in Intelligent Transportation Systems architectures. In this context, dynamic and unforeseen environment changes might be better addressed. This study deals with the emergency vehicles dispatching problem using real time information. We propose a reactive approach for vehicle dispatching based on a context aware and reconfigurable architecture. The model is intended to help allocate emergency vehicles (ambulances, fire trucks, etc.) to urban emergencies and adjust their road according to upcoming traffic changes and unforeseeable events. Optimization focuses mainly on the travel time component of response time since this is the component most affected by traffic change. Several simulation experiments are performed considering realistic scenarios. The numerical results highlight the benefits of the proposed dispatching model in improving the emergency response time and delay reducing hence confirms the effectiveness of the proposed model.

Key Words: Dynamic Vehicle dispatching, Context Aware, Reactive Dispatching, Reconfigurable Architecture, Emergency Vehicles, Intelligent Transportation Systems, Simulation.

Introduction

Le nombre des utilisateurs du transport routier croît d'une année à une autre de manière sans précédent. Depuis 20 ans, la circulation routière au Canada a augmenté de 60% et le Canadien moyen passe désormais l'équivalent de douze jours par année à voyager de chez lui au travail [1]. Bien que les embouteillages soient pour beaucoup source de frustration, la congestion grandissante des réseaux routiers engendre des problèmes bien plus graves, notamment la pollution de l'air, la pollution sonore, la hausse des coûts de livraison et surtout la difficulté pour les secours à se rendre rapidement sur les lieux d'un accident. Des vies humaines sont ainsi perdues chaque jour à cause des délais encourus par les véhicules de secours dus à la congestion.

Les systèmes d'urgence opèrent dans des environnements fortement dynamiques et subissent des perturbations assez fréquentes. Ces perturbations sont dues à deux principaux facteurs. Le premier réside dans l'arrivée dynamique des demandes de service tout au long de la journée. Celles-ci peuvent être plus ou moins critiques, mais nécessitent néanmoins des réponses promptes. Le deuxième facteur correspond aux variations dans les temps de parcours en référence à différents événements tels que les embouteillages, les accidents routiers, les pannes de véhicules en service, etc. Ainsi, les routes planifiées peuvent devenir inadaptées à la situation courante et entraîner une dégradation graduelle de la qualité de service.

Dans les systèmes d'urgence, la durée d'une intervention est un indice important de la qualité de service et des répercussions potentiellement négatives de l'événement, en particulier pour les cas graves. L'agence américaine de protection des incendies (NFPA «National Fire Protection Association») [2] a mis au point une série de codes qui servent de lignes directrices dans les opérations réelles. Selon cette norme, au moins 90% des situations d'urgences doivent être traitées à l'intérieur d'un délai de 5 minutes par la première unité d'intervention.

L'amélioration des temps de réponse aux incidents pourrait considérablement réduire les répercussions négatives et diminuer les taux de décès ou de pertes de biens. L'intégration des technologies d'information et de communication allouant une collecte et un échange rapide d'informations en temps réel sur l'état du trafic routier et des véhicules de secours pourrait augmenter considérablement la performance des systèmes d'urgence.

Ce projet s'intègre donc dans un contexte où l'on cherche à définir une stratégie de répartition dynamique des véhicules d'urgence pour optimiser le temps de réponse dans un environnement changeant tout en profitant au mieux des informations et technologies disponibles, plus spécifiquement les outils de télécommunications et les architectures distribuées. La stratégie de répartition des véhicules doit s'adapter aux variations observées dans l'environnement et assurer le meilleur compromis possible entre la qualité de la solution fournie et le temps de calcul requis.

Ce mémoire est organisé comme suit. Nous présentons dans le premier chapitre la problématique étudiée et la situons dans un contexte précis. Une revue de la littérature portant sur le problème de répartition dynamique des véhicules d'urgence et de certains thèmes sous-jacents est présentée au chapitre 2. À la fin de ce chapitre, nous abordons différentes stratégies de répartition et techniques de décision applicables dans notre cas. Nous discutons dans le chapitre 3 de l'approche de résolution contextuelle et des techniques de reconfiguration applicables à notre cas. Une étude expérimentale de notre approche et des scénarios pour sa mise en œuvre dans le domaine des transports intelligents sont présentés dans le chapitre 4. Finalement, le chapitre 5 présente une conclusion et suggère des travaux futurs.

Chapitre 1 : Contexte et problématique

1. Contexte

La sécurité routière s'intéresse à tout ce qui peut protéger les conducteurs, voyageurs et piétons et leur éviter des incidents et accidents ou, à tout le moins, minimiser leurs conséquences. Elle constitue l'ensemble des mesures visant à éviter les incidents sur la route (prévention du risque), ou à atténuer leurs conséquences (prévision). On parle alors de gestion des incidents et notre projet se situe dans ce contexte.

1.1. Incident et impacts

Par définition, un 'incident' non récurrent est défini, dans le contexte de la sécurité routière, comme tout événement qui entraîne une réduction de la capacité d'une route ou une augmentation anormale de sa demande. Ces événements comprennent les accidents routiers, les véhicules en panne, les projets de maintenance et de reconstruction des routes et les événements spéciaux à caractère "non urgent", par exemple les événements sportifs, les concerts, ou tout autre événement qui affecte de manière significative le trafic routier.

Le problème le plus souvent associé aux incidents routiers est la réduction de la capacité effective de la chaussée, ce qui provoque des files d'attente et des retards parfois importants. La limitation de l'efficacité opérationnelle du réseau de transport met tous les utilisateurs du réseau à risque et les expose à de lourdes conséquences, dont la sécurité, la pollution, les retards et les coûts de déplacement dus à la congestion.

Des études sur l'impact des incidents autoroutiers sur la capacité routière montrent qu'un incident imprévu entraîne une réduction beaucoup plus importante de la capacité de l'autoroute que la réduction physique de l'espace chaussée causée par l'incident. Ainsi, un incident bloquant une seule voie d'une autoroute à trois voies réduit sa capacité de près de 50 % [3].

Dans la plupart des régions métropolitaines, les retards liés aux incidents comptent pour 50% à 60% du retard dû à la congestion. Dans les petites régions urbaines, cette proportion peut être encore plus grande [4].

Tout retard représente un inconvénient majeur pour différentes catégories d'utilisateurs de la route comme les services de secours qui doivent envisager une augmentation de leurs temps de

réponse, voire même le risque d'occurrence d'un second accident, ce qui constitue un problème encore plus grave. De plus, l'augmentation de la consommation de carburant et tout un ensemble d'autres impacts environnementaux négatifs sont généralement associés aux incidents routiers.

L'ampleur d'un incident peut s'aggraver s'il n'est pas rapidement traité. Toute réduction de son impact sur le trafic limite les effets dommageables mentionnés plus haut en plus d'améliorer la sécurité de ceux qui ne sont pas impliqués. Une gestion efficace des incidents et accidents constitue donc un enjeu important.

1.2. La gestion des incidents

La gestion des incidents est une fonction essentielle dans la conception et le déploiement des systèmes avancés de gestion du transport (ATMS « Advanced Traffic Management System») et des systèmes avancés d'information pour les voyageurs (ATIS « Advanced Traveler Information Services »). Elle comprend principalement la détection, la vérification, l'intervention ou réponse aux incidents et le rétablissement de la fluidité de la circulation.

La gestion des incidents se définit formellement comme l'utilisation systématique, planifiée et coordonnée des ressources humaines, institutionnelles, mécaniques et techniques afin de réduire la durée et l'impact des incidents et améliorer la sécurité des automobilistes, des victimes d'accidents ainsi que des intervenants [5]. Ces ressources sont également utilisées pour augmenter l'efficacité de fonctionnement, de la sécurité et de la mobilité sur la route par la réduction systématique du temps de détection et de vérification des incidents et la mise en œuvre de réponses appropriées incluant le rétablissement de la sécurité sur les routes et la gestion du flux routier affecté jusqu'à la restauration de la pleine capacité de la route [5].

Différentes techniques de gestion des incidents ont le potentiel de réduire considérablement la congestion. Certaines de ces techniques, comme l'utilisation de panneaux à messages variables (PMV) et la radio consultative sur l'autoroute pour informer les voyageurs des incidents, peuvent être utilisées en réponse à presque tous les incidents indépendamment de leur gravité. D'autres techniques, comme la soustraction temporaire des restrictions sur les voies réservées aux véhicules à occupation multiple, ou la fermeture de rampes d'entrée aux autoroutes ne s'appliquent qu'en cas d'incidents graves qui sont susceptibles d'avoir des répercussions sérieuses sur le système de transport [5].

Les systèmes de gestion de flottes de véhicules d'urgence utilisent actuellement des capteurs, des techniques de traitement des données et des équipements de télécommunications pour améliorer leur capacité de gestion et d'intervention. Ces nouvelles facilités aident à détecter rapidement et fidèlement les incidents et à mettre en œuvre une intervention rapide afin de minimiser la congestion routière et leurs effets.

Plusieurs travaux de recherche se sont intéressés à la gestion des incidents selon ces différents axes (ex. [4], [6], [7], [8], [9]). On présentera dans ce qui suit un aperçu générique de ces travaux.

2. Aperçu sur les travaux existants relatifs à la gestion des incidents

Afin d'optimiser la gestion des incidents, il est important de prendre en compte tous leurs impacts possibles afin de les minimiser. Plusieurs travaux, dont [10], montrent les liens entre l'occurrence d'accidents et la congestion additionnelle qu'elle entraîne. Diverses méthodes de calcul rapportées dans [10], [11], [12] sont proposées pour évaluer les paramètres de congestion (retards dus à des incidents, aux événements spéciaux, à la fermeture de voies, aux conditions météorologiques, etc.) afin d'estimer la contribution de chaque paramètre dans le retard total journalier. Cette quantification des composantes de la congestion sur les sites artériels et les autoroutes est essentielle pour l'élaboration de stratégies efficaces d'atténuation de la congestion.

Les principales contributions des travaux de recherche portant sur l'optimisation de la gestion des incidents correspondent à l'introduction de méthodes innovantes à chacune des phases de la gestion d'un incident, depuis son occurrence jusqu'au rétablissement d'un état normal des routes. Ces méthodes permettent le calcul du délai [4], la détection d'incident [13], la prédiction du temps de rétablissement des routes (clearance) [6] et finalement les travaux relatifs aux méthodes qui permettent de gérer les interventions des véhicules de secours [9], [14].

2.1. Méthodes de calcul du délai

Le calcul du délai désigne en général la différence entre le temps de déplacement actuel et le temps de circulation libre sur un tronçon de la route [4]. Il peut être déterminé à l'aide de différentes méthodes adaptées à une grande variété de situations, telles qu'une autoroute ou un système artériel.

Le délai peut être «récurrent» ou «non récurrent». Les retards récurrents constituent les retards quotidiens rencontrés lors des déplacements et qui peuvent être déduits à partir de données historiques. Les retards non récurrents sont ceux causés par des incidents ou accidents et se divisent généralement en deux périodes, soit le délai immédiat et le délai résiduel. Le premier désigne le retard encouru pendant l'incident alors que le second constitue le retard subi après que l'incident ait été traité et que les routes aient été rétablies.

Dans [7], les auteurs ont développé une approche pour le calcul du volume des retards cumulés sur les autoroutes en utilisant deux courbes de volume cumulatif (l'une pour l'arrivée et l'autre pour le départ du site de l'incident) tracées sur un axe temporel. La zone située entre ces deux courbes représente le retard supplémentaire dû à l'incident. D'autres approches comme les diagrammes de files d'attente [15] utilisent des données comme la durée de l'incident, la capacité de la route avant et après l'incident et la demande du trafic pour calculer le retard. L'estimation du trafic en temps réel basée sur la simulation informatique constitue un autre moyen de modélisation des retards pendant les incidents.

2.2. Détection de l'incident

La détection des incidents est une autre étape cruciale qui affecte les actions à entreprendre et qui détermine la fiabilité et l'efficacité du système de gestion. Une détection rapide et fiable est désormais fondamentale.

La performance d'un système de détection d'incidents peut être évaluée à deux niveaux, soit au niveau des technologies de collecte des données et au niveau des algorithmes de traitement des données. Des efforts considérables ont été consacrés à l'amélioration des techniques de détection d'incidents, y compris le déploiement de nouvelles technologies de détection (capteurs) et le développement d'une variété d'algorithmes de traitement.

Récemment, on a observé une tendance à délaisser les algorithmes de traitement des données basés sur des systèmes de surveillance traditionnels comme les systèmes de détection par boucle (vu leur taux élevé de fausses alarmes et défaillances fréquentes) pour les remplacer par des détecteurs/capteurs de trafic tels les systèmes de communications entre véhicules et infrastructures (VRC « Vehicle to Road side Communication ») ou encore l'identification automatique des véhicules (AVI « Automatic Vehicle Identification ») et la localisation

automatique des véhicules (GPS « Global Positioning System », systèmes de géolocalisation cellulaire) [13].

Plusieurs catégories d'algorithmes existent pour détecter des incidents [13], par exemple les algorithmes comparatifs qui comparent certains paramètres du trafic observé à des seuils préétablis. Cette catégorie comprend les algorithmes d'arbres de décision (DT « Decision Tree »), certains algorithmes de reconnaissance de formes (PATREG), etc.

D'autres catégories incluent les algorithmes statistiques (ex. séries chronologiques), les algorithmes utilisés en intelligence artificielle comme les réseaux de neurones, les algorithmes de traitement d'images, etc. Dans cette dernière catégorie, on suppose que le trafic obéit à des modèles prévisibles et les incidents sont détectés quand les mesures des capteurs s'écartent significativement des prévisions [6].

De nouvelles catégories sont aussi apparues récemment comme les algorithmes à base de sondes et les algorithmes basés sur les véhicules en déplacement [6].

2.3. Durée totale de l'incident

Une utilisation efficace des techniques de gestion des incidents nécessite la capacité de prédire la gravité d'un incident en temps réel afin d'y apporter la meilleure réponse. La durée totale d'un incident est une des mesures fréquemment utilisées pour évaluer sa gravité compte tenu de son impact sur tous les utilisateurs du système [16]. D'autres mesures possibles existent, comme le temps de rétablissement, la longueur des files d'attente causées par l'incident, ou le degré des blessures et dommages matériels.

L'intervalle de temps entre l'apparition d'un incident et le retour à des conditions de circulation normales est appelé durée totale de l'incident. Elle se compose de plusieurs éléments: le temps de détection / vérification, le temps de réponse des équipes de secours, et le temps de rétablissement des routes comme le montre la Figure 1-1.

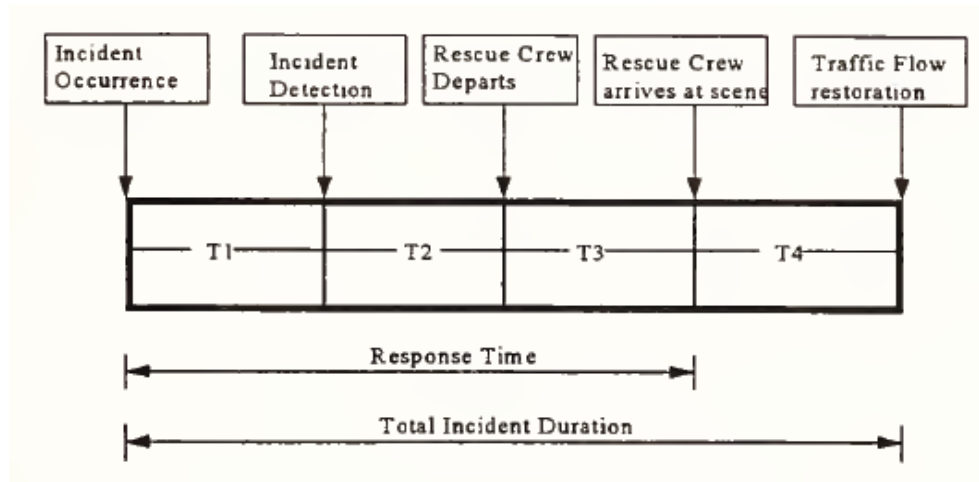


Figure 1-1 Composantes de la durée d'un incident (Madanat et Feroze [16])

Le temps de détection des incidents (T1) est le temps entre l'occurrence de l'incident et sa détection. Le temps de réponse ($T1 + T2 + T3$) est le délai entre l'apparition de l'incident et l'arrivée de l'équipe de secours. Le temps de rétablissement des routes (T4) est le temps entre le début de l'opération de secours sur place et la fin de l'opération de nettoyage. Cela comprend les services d'urgence (si nécessaire), l'enquête sur l'incident et le retrait des débris [16].

Les principaux facteurs influençant la durée d'un incident sont: le type d'incident, le nombre de véhicules impliqués, le nombre et la gravité des blessures, le nombre de voies affectées, les conditions environnementales, les techniques de localisation et d'intervention [6]. L'approche la plus populaire pour analyser la durée totale d'un incident est basée sur la notion de danger [17]. Beaucoup d'autres modèles existent pour évaluer la durée d'un incident comme les modèles de régression linéaire basés sur différentes caractéristiques comme le type d'incident, les conditions météorologiques, le nombre de véhicules et des voies impliquées. Par ailleurs, les arbres de décision [18] n'exigent pas la connaissance de toutes les caractéristiques observables d'un incident. Dans [8], les auteurs suggèrent aussi l'utilisation de la régression non paramétrique, où la durée d'un incident est basée sur l'occurrence d'incidents semblables dans le passé.

Même en absence d'un processus formel de gestion d'incidents, les fonctions citées ci-dessus ont toujours lieu, quoique moins efficacement et plus lentement. Les tâches de gestion d'incidents se réalisent habituellement de façon simultanée et sont souvent exécutées de façon répétitive. Le temps économisé avec un système de gestion d'incidents dépend de la bonne

gestion de chacune des étapes: la détection, la vérification, la réponse et le rétablissement de la fluidité de la circulation sur les routes.

L'une des phases importantes de la gestion des incidents en ce qui concerne la sécurité routière est la phase de réponse, qui correspond à la gestion des véhicules d'urgence, en particulier la répartition des véhicules d'urgence. Notons que si cette phase n'est pas optimisée, la qualité des phases suivantes de la gestion des incidents sera affectée et plus particulièrement le temps nécessaire au rétablissement de la fluidité de la circulation. Nous présentons dans la section suivante une analyse de la répartition dynamique des véhicules d'urgence.

3. Problématique de la répartition des véhicules d'urgence

La gestion des véhicules d'urgence porte formellement sur la localisation et l'affectation des véhicules de secours ou d'urgence. Le problème de localisation des véhicules vise à déterminer leur répartition spatiale de manière à ce qu'un pourcentage donné des incidents, qui arrivent de façon dynamique durant la journée (90% par exemple), soit associé à un temps de réponse inférieur à une valeur fixée (8 minutes par exemple). L'affectation quant à elle consiste à déterminer le véhicule (selon sa nature et sa position courante) qui doit répondre à un appel. Ce choix est déterminé, entre autres, par le degré d'urgence de l'appel et, pour les cas moins urgents, par ses conséquences sur la couverture territoriale. La règle de choix la plus fréquemment utilisée consiste à affecter le véhicule le plus proche du lieu de l'incident, mais d'autres règles sont possibles comme la minimisation de l'impact de l'affectation sur la couverture territoriale ou sur le coût de déplacement, surtout lorsque le cas est considéré comme non urgent.

Suite à la détection d'un incident, une réponse est planifiée en fonction de la compréhension des causes de l'incident et des mesures et/ou des ressources nécessaires pour rétablir les conditions normales par les équipes de gestion des véhicules d'urgence, soit les ingénieurs routiers et les représentants des organismes étatiques et locaux. Un plan approprié de réponse à l'incident (nombre et types d'équipages et de véhicules nécessaires, itinéraire à suivre, etc.) sera alors fixé et des itinéraires de déviation de la circulation seront déterminés.

Réduire le temps nécessaire au personnel d'urgence et aux équipements pour atteindre le site d'un accident est prioritaire lors de la mise en place de plans de secours. Toutefois, la majorité des systèmes de gestion de véhicules d'urgence ne tiennent compte que des événements

récurrents sur la route qui incluent les variations du trafic selon les heures de la journée. Par la suite, aucun plan de suivi n'est défini pour la gestion des événements imprévus. De ce fait, un véhicule en cours de route doit atteindre sa destination même si un imprévu provoque un délai considérable sur sa route. Dans le meilleur des cas, un autre véhicule de remplacement sera acheminé après un certain délai.

Pourtant, les services d'urgence sont parfois confrontés à des événements imprévisibles : pannes, congestions, demandes incertaines, etc. Des changements dans les conditions du trafic sur les itinéraires prévus des véhicules de secours sont très probables vu le caractère complexe et dynamique du réseau routier. Cette dynamique se situe à différents niveaux. Par exemple, l'état du trafic sur une route donnée varie normalement selon la journée ou l'heure de la journée. Mais certains événements imprévus (accidents, pont mobile bloqué, etc.) ou prévus (travaux, événements sociaux, sportifs, etc.) peuvent influencer énormément sur l'état du trafic. De plus, le comportement des automobilistes a également un impact. En effet, leurs choix individuels d'itinéraires peuvent provoquer des encombrements plus ou moins importants sur les routes. Ces paramètres et beaucoup d'autres agissent sur l'état du trafic et, par conséquent, sur l'itinéraire optimal entre deux points du réseau.

Les systèmes de gestion des véhicules d'urgence doivent donc être en mesure de faire face à ces incertitudes et à l'évolution en temps réel des conditions du trafic lors de la prise de décisions. Comme l'état du système est amené à évoluer de façon dynamique, des suivis et correctifs ponctuels sont nécessaires afin de maintenir un service adéquat.

Un certain nombre de modèles ont été développés pour accommoder ce dynamisme [19], [20], [21]. Cependant, peu d'entre eux s'adaptent véritablement au degré d'incertitude présent dans l'environnement.

Afin de mieux comprendre notre contribution dans ce contexte, examinons quelques scénarios basés sur l'apparition d'une congestion imprévisible sur les parcours planifiés des véhicules d'urgence. Nous nous concentrerons plus particulièrement sur le temps de parcours puisque c'est l'élément qui est le plus affecté par les décisions de routage et de répartition.

3.1. Exemples de scénarios de congestion imprévisible

Des exemples concrets qui illustrent les risques pour un véhicule d'urgence de se retrouver dans une congestion suite à des changements ayant un impact sur son itinéraire préétabli sont présentés dans les Figures 1-2 et 1-3 ci-dessous.

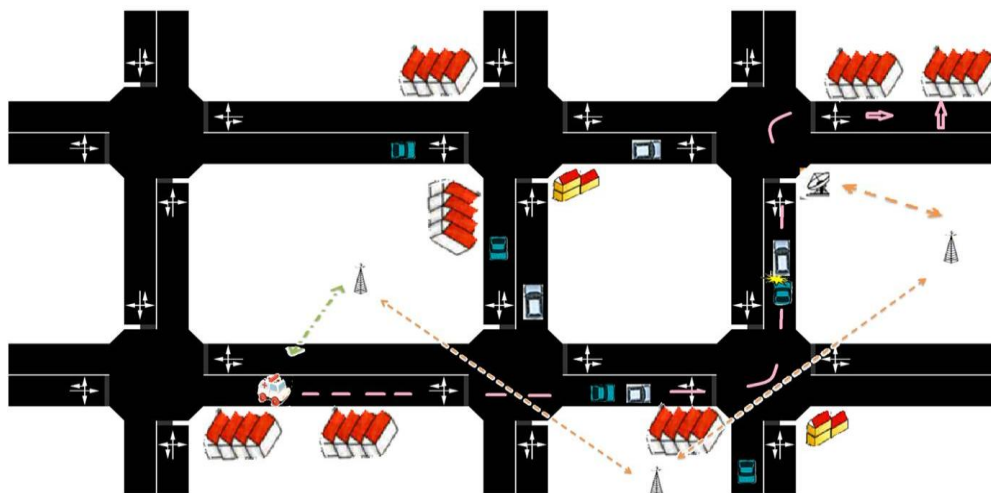


Figure 1-2 Une collision entre deux voitures sur la route du véhicule d'urgence

Considérons dans ces deux exemples un réseau de transport urbain. Dans chacun des deux cas, un véhicule d'urgence doit répondre à un accident. On suppose que lors du choix des itinéraires respectifs des véhicules, la circulation était fluide et stable. Cependant, cette stabilité s'est trouvée affectée ultérieurement par des événements ayant un impact sur les flux et la capacité de passage en certains points du réseau routier. Dans de tels cas, il y a une possibilité de congestion et la circulation devient alors plus difficile et risquée.

Dans la Figure 1-2 un deuxième accident, soit une collision entre deux voitures, s'est produit sur l'itinéraire planifié du véhicule d'urgence (l'itinéraire en rose dans la Figure 1-2). Ainsi, un risque potentiel de formation d'une queue d'attente sur le site du deuxième accident ainsi qu'un ralentissement de la circulation sont envisageables.

Dans la Figure 1-3 un obstacle imprévisible, ici la chute d'un arbre qui obstrue la route, s'est produite sur la route planifiée du véhicule d'urgence (l'itinéraire en rose dans la Figure 1-3). D'où le risque de fermeture complète des voies de circulation et un ralentissement, voire un blocage, envisageable de la circulation dans cette direction.

Conséquemment, une augmentation du temps de réponse des véhicules d'urgence en route, une aggravation de la congestion et du retard sur les sites.

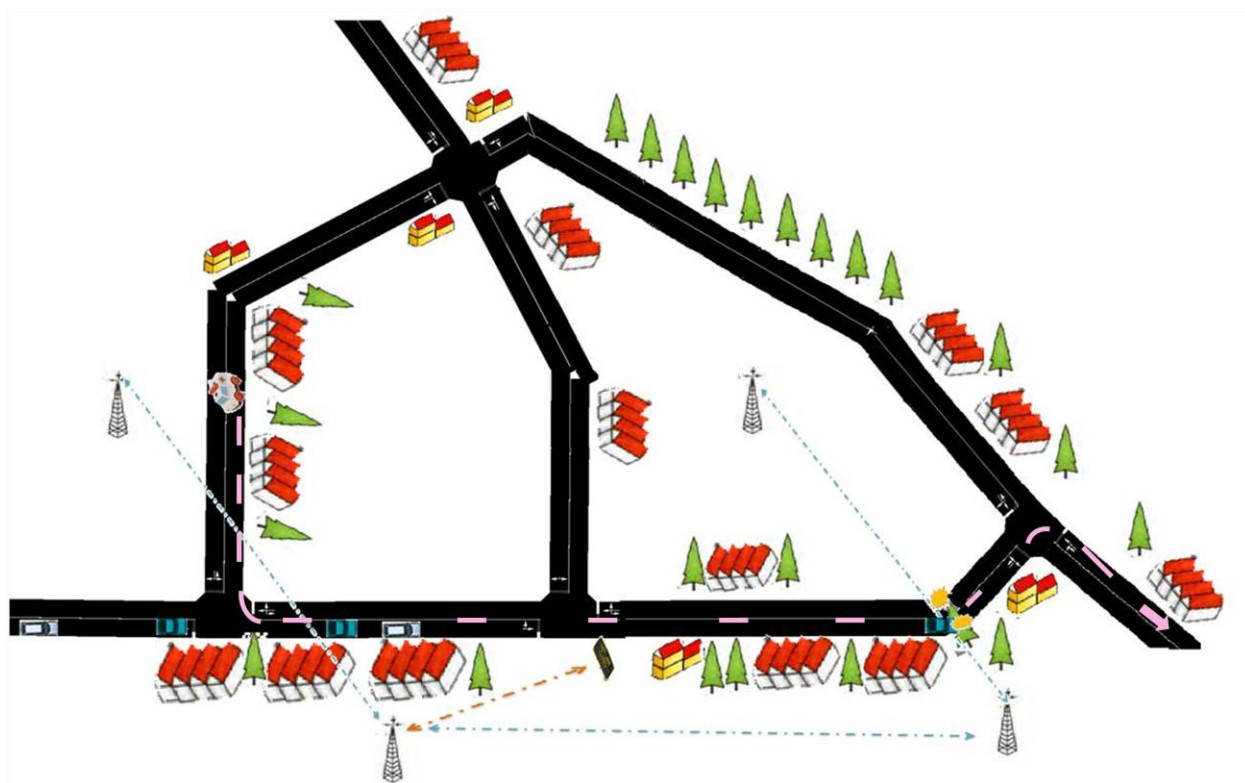


Figure 1-3 Chute d'un arbre sur la route du véhicule d'urgence

Dans ces deux exemples, un retard dans la transmission de l'information aux véhicules de secours qui s'approchent de ces sites ainsi qu'un retard dans la gestion de la nouvelle information (via, par exemple, la détermination d'itinéraires de déviation de la circulation) impliqueront inévitablement l'engagement des véhicules dans la file d'attente du deuxième incident et leur ralentissement.

Plusieurs scénarios quant aux conséquences d'un retard dans les temps de réaction face à des événements imprévus sont envisageables. Dans un premier scénario, on pourrait songer à un ralentissement du véhicule de secours qui doit passer près du site du deuxième incident (dans le cas du premier exemple) ou même un arrêt complet (dans le cas du deuxième exemple).

Dans un deuxième scénario, le véhicule de secours peut attendre le rétablissement de la circulation. Un autre scénario consiste à envoyer une autre ressource de secours, s'il en existe, pour remplacer le véhicule coincé sur la route.

Les deux premiers scénarios mènent à une augmentation significative, voire même trop importante, du temps de réponse des équipes de secours (en particulier, dans le cas de la route obstruée par un arbre) et conséquemment des retards au niveau du rétablissement de la circulation. Le retard total subi par les autres usagers est ainsi accentué ce qui peut augmenter leur niveau de frustration et mener à d'autres incidents ou accidents.

Dans le dernier scénario, une perte de ressources physiques et matérielles est subie. De plus, un autre risque potentiel est l'occurrence d'un autre incident dans la zone de couverture du véhicule de remplacement, qui risque de devenir non couverte suite à l'engagement de tous ces véhicules.

En somme, si on examine le retard total calculé par le centre de gestion, à partir d'algorithmes connus, comme les modèles de régression linéaire, il est fort probable que la valeur obtenue soit une sous-estimation du retard véritable, étant donné que l'algorithme ne peut tenir compte de toutes les conséquences du premier incident sur les temps de parcours. Il est donc nécessaire de recalculer le retard lorsqu'un nouvel événement survient dépendamment du scénario de recours envisagé par le centre de gestion.

Le temps économisé en utilisant un système de gestion d'incidents dépend ainsi largement de la bonne gestion de toutes les étapes de résolution d'un incident. Une réaction en temps réel face aux incertitudes de l'environnement et aux fluctuations des conditions du trafic s'avère donc cruciale lors de la phase de réponse et de répartition des véhicules d'urgence, vu les répercussions d'un délai durant cette phase sur durée totale de l'incident. Toutefois, une gestion de véhicules d'urgence en temps réel est-elle réellement possible ?

3.2. Potentialité de la gestion en temps réel

La réaction en temps réel du système de gestion face aux incertitudes de l'environnement et aux fluctuations des conditions routières s'avère un défi difficile à relever dans les systèmes classiques de transport. En effet, ces systèmes reposent souvent sur des informations à moyen terme, comme des statistiques sur les changements de trafic selon le jour ou l'heure de la journée.

Les nouvelles technologies de l'information ont heureusement ouvert de nouvelles perspectives pour les systèmes de gestion. Beaucoup d'efforts ont été consacrés au cours de la

dernière décennie sur le déploiement de nouvelles technologies de l'information et de la communication dans le domaine des transports, menant à ce que l'on appelle les systèmes de transport intelligent (STI), qui ont pour but d'améliorer la performance des infrastructures routières en termes de sécurité, fluidité du trafic et réduction des émissions de CO₂.

Les nouvelles technologies de l'information permettent essentiellement d'augmenter la quantité et la qualité des informations, mais touchent également à la rapidité avec laquelle celles-ci sont transmises. Ainsi, elles permettent d'appréhender de manière totalement originale la transmission de l'information depuis la détection de l'incident jusqu'à l'arrivée du véhicule d'urgence sur le lieu d'intervention.

Les systèmes de transport intelligents utilisent actuellement des technologies variées, allant de systèmes de gestion basiques comme les systèmes de gestion des feux de circulation aux carrefours, les systèmes de gestion des conteneurs, les panneaux à messages variables, les radars automatiques ou la vidéosurveillance, jusqu'aux applications plus avancées qui intègrent des données en temps réel avec retour d'informations provenant de plusieurs sources, comme les informations météorologiques, les systèmes de navigation embarqués générant des temps de parcours en temps réel, etc. [22].

Aussi, l'émergence des systèmes de surveillance des réseaux autoroutiers via l'utilisation des technologies de détection automatique, telles que les boucles électromagnétiques et le traitement d'images, permettent à l'opérateur de service de visualiser en temps réel, via une console intelligente, l'état courant du réseau en terme d'incidents et de coordonner le déclenchement et le suivi des interventions sur le terrain. Ceci permet de réduire les délais de notification d'incidents, de sélectionner le nombre et le type de véhicules à acheminer et d'améliorer la qualité de l'évaluation initiale de la gravité de l'incident.

Auparavant, l'équipage d'un véhicule d'urgence était relié uniquement par radio communication avec le centre de répartition. Il n'était possible de communiquer avec ce dernier qu'une fois le véhicule arrivé sur le site de l'incident. Les nouveaux systèmes de télécommunications permettent aujourd'hui d'établir également une liaison numérique et sans fil entre le centre de répartition et les véhicules de secours, voire même des communications inter-véhiculaires. En effet, le concept de véhicules connectés basé sur l'intégration de capteurs et de

technologies de communication dans les véhicules [20], [23], [24] représente un nouveau cadre pour la gestion de véhicules qui rend possible la diffusion des informations en temps réel entre les véhicules. Ainsi, des informations telles que les coordonnées de l'appel, le degré de gravité, le chemin le plus court pour se rendre sur les lieux, etc. peuvent être communiquées directement sur l'ordinateur de bord du véhicule.

Il devient alors possible d'apporter des améliorations continues en temps réel et de fournir les solutions obtenues aux véhicules en cours de route (par exemple, pour dévier un véhicule de sa destination courante afin d'éviter un obstacle ou servir une demande plus urgente dans son voisinage).

Les stratégies de gestion et les approches de résolution utilisées pour s'adapter aux incertitudes et dynamismes du système routier restent primordiales pour la réussite du système de gestion. Celles-ci doivent faire appel à des traitements beaucoup plus complexes et sophistiqués qui permettent de gérer et exploiter utilement une énorme quantité d'informations en temps réel.

Les chercheurs ont donc été amenés à développer et évaluer des systèmes pour les interventions d'urgence qui exploitent en temps réel des informations sur les temps de déplacement afin d'affecter les véhicules d'intervention les plus appropriés et les orienter vers les meilleurs itinéraires possibles.

3.3. Besoins apparents de la gestion en temps réel

Il est clair que les paramètres sur lesquels les décisions de répartition sont fondées peuvent changer de manière non prévisible (par exemple, les temps de parcours peuvent changer radicalement suite à un incident sur le réseau). Ainsi, la conception d'un système qui assure un traitement approprié des paramètres de décision du répartiteur à l'égard de la situation actuelle de répartition est une tâche difficile qui est aggravée par la nécessité de répondre à des contraintes temporelles. Plus précisément:

- Les demandes de services arrivent de façon dynamique tout au long de la journée. Ce qui nécessite une ré optimisation ou une réaffectation dynamique de la solution.

- Le système de répartition des véhicules d'urgence est amené à réagir en continu aux changements dans l'environnement et à décider des modifications à apporter à la solution courante. Ainsi un haut degré de réactivité est nécessaire.
- La dimension temps réel ajoute une nouvelle contrainte puisqu'il est nécessaire de concevoir des systèmes qui permettent aux décideurs de trouver non seulement des solutions optimisées, mais également robustes contre l'incertitude et les fluctuations de l'environnement tout en demeurant efficaces. D'où la nécessité de systèmes réactifs capables de réagir rapidement aux changements (ex. diversion d'un véhicule en cours de route vers un autre appel tout en tenant compte des coûts, inconvénients et bénéfices reliés à une telle action).
- Prendre des décisions en ligne nécessite des temps de réponses quasi instantanés, car si le temps alloué pour la prise de décision est trop long, les bénéfices associés à un changement de parcours ou à une diversion seront perdus. Un temps de calcul trop long augmente le temps de réponse total et ainsi détériore la performance d'ensemble du système.

4. Objectif de la recherche

Le problème de gestion dynamique des véhicules d'urgence face à des événements imprévus et qui tient compte des apports des nouvelles technologies est un problème d'actualité fort intéressant. La sophistication des méthodes d'optimisation, la puissance de calcul des ordinateurs actuels, ainsi que l'émergence des technologies des communications inter-véhiculaires, permettent d'aborder cette problématique avec des chances raisonnables de succès.

Il est donc opportun de procéder à une étude des méthodes déployées jusqu'à présent pour la répartition des véhicules d'urgence, d'analyser leurs comportements vis-à-vis des incertitudes de l'environnement et de soulever leurs lacunes et les difficultés potentielles d'adaptation aux besoins selon les scénarios présentés précédemment. Il est aussi important d'identifier les défis et contraintes auxquels sera confronté un centre de gestion en ligne des véhicules et de discuter des possibilités de modifier les approches proposées.

L'objectif principal de notre étude est la minimisation des délais d'intervention des véhicules d'urgence conformément au problème de répartition dynamique des véhicules d'urgence que nous situons dans le contexte des systèmes de transport intelligents.

L'atteinte des objectifs secondaires suivants permet de réaliser l'objectif principal. Il s'agit de trouver des solutions pour :

1. Modéliser le système de répartition (gestion) dynamique des véhicules en considérant des communications entre les composantes du réseau de transport et le centre de répartition des véhicules.
2. Identifier des événements émanant du réseau routier et ayant un impact sur les véhicules d'urgence.
3. Identifier des approches de ré-optimisation adaptées au contexte.
4. Maximiser l'utilisation de la flotte de véhicules d'urgence.

L'importance de cette recherche réside en partie dans sa nouveauté. À ce jour, l'étude de la gestion des interventions des véhicules d'urgence dans des environnements dynamiques a reçu très peu d'attention. Dans le souci de fournir les «premiers secours » dans les meilleurs délais, une étude sur les bénéfices de l'usage des informations temps réels vis-à-vis les effets des variations des flux de trafic sur les parcours véhicules d'urgence est d'un grand intérêt.

Ainsi, le but de notre projet est de concevoir une approche adaptative de gestion des véhicules d'urgence qui tient compte des incertitudes de l'environnement et qui repose sur l'usage des nouvelles technologies d'informations pour la collecte et l'échange d'informations. Cette approche permettra aux les véhicules d'urgence d'interagir rapidement avec leur environnement et minimiser les délais.

L'approche de gestion des véhicules d'urgence que nous concevons sera implémentée afin de valider son efficacité. Nous considérons des simulations de scénarios de trafic urbain présentant des événements imprévus (tel que définis dans le sous-objectif 2). Les apports que nous proposons de prouver par ces simulations concernent essentiellement la minimisation des délais d'intervention tout en maintenant la stabilité requise du système de gestion en réduisant les réaffectations en chaîne.

.

Chapitre 2: État de l'art

Une bonne gestion d'une flotte de véhicules d'urgence joue un rôle important dans l'amélioration de la qualité des services offerts par les organismes publics tels que les services de secours, les services paramédicaux, les pompiers et la police. Ces systèmes d'urgence sont sujets à des perturbations de leur environnement qui peut engendrer une dégradation de leur qualité de service. Afin de réduire le plus possible cette dégradation, des approches basées sur l'utilisation des nouvelles technologies d'information et de communication menant à une meilleure adaptation dans un contexte dynamique ont fait l'objet de plusieurs études.

Cette revue de la littérature présente les travaux pertinents dans ce domaine avec un accent sur le caractère dynamique du problème dans un contexte STI. Étant donné le nombre limité de contributions dans la littérature existante sur cette problématique spécifique, nous analyserons également les contributions pour le problème générique de tournées de véhicules afin de donner une vision plus globale des idées applicables à notre problème.

Le problème de tournées de véhicules (VRP « Vehicle routing problem») avec ses différentes variantes est d'abord introduit et suivi d'une présentation du problème de répartition des véhicules d'urgence. Nous donnons un aperçu des contributions pour ce problème, en débutant avec la version statique pour ensuite aborder la version temps réel caractérisée par des temps de parcours dynamiques. Ceci nous permettra d'aborder le déploiement des nouvelles technologies d'information et de communication dans le cadre des STI. Ensuite, les architectures de gestion et les approches de résolution pour le VRP sont examinées avec un accent sur les méthodes de ré-optimisation. Il sera ensuite question du calcul du plus court chemin dans un réseau routier intégrant des éléments d'incertitude. Finalement, les critères et les contraintes à considérer lors du choix d'une solution sont explicités.

Étant donné que notre objectif est de minimiser le temps d'intervention des véhicules d'urgence dans un environnement incertain, on mettra surtout l'accent sur les architectures de gestion et les approches de ré-optimisation les plus adaptées à ce contexte. C'est pourquoi nous étudierons plus particulièrement la modélisation de l'environnement de résolution dans les systèmes de type STI.

Nous essaierons de comprendre tout au long de ce chapitre à quel point les travaux existants satisfont les exigences de notre problématique. Ainsi, le dynamisme sera étudié dans la deuxième section. Nous analyserons ensuite dans la troisième section les architectures de résolution déployées pour satisfaire les exigences du temps réel. Finalement, la réactivité fera l'objet de la quatrième section. Les idées intéressantes et les lacunes seront analysées à la fin du chapitre.

1. Introduction au problème de routage et répartition de véhicules

À première vue, le problème de répartition des véhicules d'urgence semble apparenté au problème classique de tournées de véhicules. Il s'en distingue toutefois du fait qu'un véhicule d'urgence doit compléter le service à un client avant de pouvoir être affecté à un autre client (il n'y a donc pas de tournées comme telles). De plus, il faut aussi maintenir une couverture adéquate de la zone desservie afin de pouvoir répondre aux appels d'urgence dans les meilleurs délais.

Le problème de tournées de véhicules est un problème classique d'optimisation combinatoire qui correspond à une généralisation du problème du voyageur de commerce (« Traveling Salesman Problem », TSP). Dans le problème de VRP, on cherche à déterminer les meilleures routes possibles afin de desservir des clients à l'aide d'un certain nombre de véhicules. Le parcours de chaque véhicule débute à un dépôt central et visite un sous-ensemble de clients pour servir leur demande avant de retourner au dépôt.

Deux points importants doivent être considérés dans ce problème: l'affectation des clients aux véhicules et le séquençement le plus approprié des clients au sein de la tournée de chaque véhicule de façon à minimiser la distance totale parcourue.

Des contraintes de capacité ou de distance maximale, des intervalles de service ainsi que d'autres exigences supplémentaires relatives aux conducteurs et aux véhicules peuvent également restreindre l'espace des solutions admissibles. Il existe plusieurs formulations du problème. La formulation introduite dans [25] a l'avantage de présenter explicitement les différentes caractéristiques du VRP, à savoir l'imbrication des problèmes d'affectation et de séquençement. Cette formulation est définie sur un graphe $G = (V, A)$ où V est l'ensemble des sommets de cardinalité $n+1$, comprenant tous les clients et le sommet 0 qui représente le dépôt où commence et se termine la tournée de chaque véhicule, et A est l'ensemble des arcs. On

retrouve deux types de variables de décision : y_{ik} prend la valeur 1 si le sommet i est affecté au véhicule k (0 sinon), et x_{ijk} prend la valeur 1 si le véhicule k parcourt l'arc $(i,j) \in A$ pour $i \neq j$ (0 sinon) [26]. Le modèle est alors le suivant :

$$\text{Min} \quad \sum_{k=1}^m \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ijk}$$

$$\begin{aligned} \text{Et tel que} \quad & \sum_{i=1}^n q_i y_{ik} \leq C & k=1 \dots m \\ & \sum_{k=1}^m y_{ik} = 1 & i=1 \dots n \\ & \sum_{k=1}^m y_{0k} \leq m \\ & \sum_{j=0}^n x_{ijk} = \sum_{j=0}^n x_{jik} = y_{ik} & k=1 \dots m; \quad i=0 \dots n \end{aligned}$$

où :

c_{ij} est le coût de déplacement sur l'arc (i,j) , q_i est la demande du client i , C est la capacité d'un véhicule et m est le nombre de véhicules.

Les contraintes assurent respectivement le respect de la capacité des véhicules, l'affectation de chaque client à un seul véhicule et le respect du nombre de véhicules disponibles. La dernière contrainte assure la continuité de la route, à savoir qu'un véhicule qui entre dans un sommet doit en sortir.

L'une des principales motivations pour étudier le VRP est son adéquation à de nombreuses applications pratiques en logistique. Optimiser des tournées de véhicules a également des retombées économiques et environnementales liées à la minimisation des coûts de transport [27] [28] [29]. Ainsi, selon Toth and Vigo [27], les frais de transport représentent habituellement entre 10% et 20% du coût final des marchandises sur le marché, et les procédures informatisées basées sur des méthodes d'optimisation permettent de faire des économies de l'ordre de 5% à 20% sur les coûts de transport.

1.1. Variantes du problème de tournées de véhicules

Les problèmes de tournées de véhicules modélisent une variété d'applications importantes comme, par exemple, les services de collecte et de livraison du courrier, les services de réparation résidentiels, le transport des personnes âgées ou handicapées, etc. Différents critères de classification existent dans la littérature dont [30] :

- L'étendue de la zone de service (local, régional, national, international).
- Le nombre de véhicules (un ou plusieurs).
- Le type de service (problème de collecte ou de livraison ou les deux en même temps).
- La prise en compte de la dépendance au temps des temps de parcours.
- La prise en compte de fenêtres de temps pour le service aux clients
- L'existence de contraintes de capacité

Des exemples d'applications classées selon les critères de capacité et de type de service sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 1- Problèmes locaux de routage et répartition dynamiques (Gendreau et Potvin, [30])

	Collecte et livraison	Collecte ou livraison
Capacité limitée	Transport à la demande (TAD)	Taxi
Capacité illimitée	Courrier express	Services de courrier et de réparation

Dans le cas des problèmes de nature dynamique, on considère aussi le degré de dynamisme de l'environnement. Nous porterons une attention spéciale à cet aspect dans la suite, puisque nous nous intéressons tout particulièrement au dynamisme de l'environnement dans cette étude.

1.2. Problème de répartition de véhicules d'urgence en temps réel

Le problème de répartition des véhicules d'urgence (police, pompiers, ambulances) est un exemple de problème dynamique. Cependant, il n'y a pas de tournées comme telles, car chaque véhicule s'occupe d'un seul appel à la fois. Une fois sa tâche terminée, le véhicule se repositionne en attendant le prochain appel qui lui sera affecté. Le problème est alors d'affecter le véhicule le plus approprié (par exemple le plus proche) à chaque nouvel appel. Lorsqu'on prend en compte la priorité des appels d'urgence et les types de véhicules, ce problème d'affectation devient similaire à un problème d'affectation généralisée (« general assignment problem » GAP) (affecter n tâches à m machines de la meilleure façon possible). Le problème d'affectation généralisée (GAP) est un problème bien connu en optimisation combinatoire [31].

Les méthodologies de répartition dans les services d'urgence sont très souvent basées sur l'analyse de la zone desservie pour décider quel véhicule doit être affecté à un nouvel appel et où

relocaliser les véhicules et les équipages inactifs. Celles-ci sont aussi basées sur des stratégies propres à chaque organisation.

L'objectif principal des décideurs dans les systèmes d'urgence est de sauver des vies humaines en prenant des décisions rapides afin d'acheminer des véhicules dans les plus courts délais vers le site de l'appel tout en gardant une couverture appropriée de la zone desservie. C'est pourquoi les systèmes de répartition de véhicules d'urgence sont soumis aux contraintes les plus exigeantes en termes de qualité de service (temps de réponse ici). De ce fait, la minimisation du temps de réponse constitue l'objectif principal d'un système d'urgence.

Les décideurs doivent garder une trace en temps réel de l'état courant de chaque véhicule afin de réagir de façon appropriée à tout nouvel événement. Les stratégies utilisées dans la pratique comprennent principalement la réaffectation et le ré-routage qui nécessitent un bon support technologique. La réaffectation consiste à rediriger un véhicule déjà en route pour servir un appel vers un nouvel appel d'urgence plus grave qui vient tout juste d'être reçu. Le re-routage, d'autre part, signifie que les véhicules peuvent modifier leur itinéraire pour se rendre sur le site d'un appel en fonction de l'état du trafic. Ces problématiques se prêtent donc bien à l'émergence des nouvelles technologies. C'est ainsi que la possibilité d'obtenir et d'exploiter des informations en temps réel ouvre la porte à de nouveaux champs d'études.

Dans ce qui suit, nous présentons les principales contributions et innovations recensées dans la littérature sur ce sujet.

2. Un aperçu des contributions portant sur les systèmes d'urgence

Les systèmes d'urgence représentent un sujet fort intéressant pour les spécialistes en recherche opérationnelle et en gestion. Les travaux en répartition de véhicules d'urgence font généralement appel à trois approches: les files d'attente, la programmation mathématique et la simulation. Dans la majorité des travaux rapportés dans la littérature sur les systèmes d'urgence, les études se concentrent essentiellement sur l'emplacement des véhicules, la taille de la flotte, et la performance des opérations.

La majorité des modèles mathématiques ont été développés pour répondre aux problématiques suivantes:

- Localisation des stations d'ambulance ou des ambulances individuelles au sein de la zone desservie selon certains critères de performance tels que le temps de réponse [32].
- Détermination du nombre minimum d'ambulances nécessaires pour couvrir une zone donnée.
- Stratégies de répartition et leur influence sur les performances du système.

Dans [17] par exemple, Haghani *et al.* ont proposé un modèle mathématique en nombres entiers pour l'affectation des véhicules d'urgence dont l'objectif est de réduire le temps de parcours total.

Larson [34] a effectué d'importants travaux sur les systèmes d'urgence en faisant appel à des méthodes de files d'attente. Toutefois, le développement de méthodes analytiques (programmation mathématique et modèles de files d'attente) pour les systèmes d'urgence est une tâche plutôt difficile puisque même si on parvient à construire un modèle analytique approprié, il est souvent difficile de le résoudre en utilisant des techniques connues [35].

Cette limitation est généralement surmontée par l'utilisation de la simulation pour représenter le système d'urgence et tester ses performances. L'application de modèles de simulation permet non seulement de trouver une solution optimale à un problème de décision, mais aussi d'observer un système d'urgence sous différentes hypothèses (ex. [9], [14], [36]). Elle permet également de tester de nouvelles stratégies opérationnelles telles que des emplacements différents pour les véhicules en attente ou différentes règles de répartition.

2.1. Problème de répartition avec temps de parcours statique

Diverses règles de répartition ont été élaborées et appliquées dans des modèles de simulation et en exploitation réelle de véhicules d'urgence, comme la règle du premier arrivé, premier servi (FCFS ou « First Come, First Served »), le plus proche de l'appel d'origine (NO « Nearest Origin ») ou la plus haute priorité en premier (HPFS « Highest Priority, First Served ») (ex. [9], [35], [37]). La solution la plus évidente consiste à affecter le véhicule disponible le plus proche de l'appel (NO), mais à long terme et avec une flotte limitée de véhicules d'urgence, la qualité du service peut devenir insatisfaisante, en particulier lorsque le temps entre deux appels est court, car elle peut mener à une couverture insatisfaisante du territoire desservi.

Dans la plupart des études (ex. [32], [34]), le temps de parcours est supposé connu avec certitude et demeure constant tout au long de la journée de telle sorte que les itinéraires peuvent être planifiés avec exactitude dès la réception d'un appel. Dans ce cas, on utilise l'itinéraire obtenu avec un algorithme de plus court chemin statique. C'est le cas par exemple lorsque les chauffeurs utilisent des itinéraires calculés par un logiciel de cartographie faisant appel aux limites de vitesse.

Pour le problème de couverture, de nombreux modèles ont été proposés. Les modèles statiques les plus importants sont les LSCM (« Location Set Covering Model ») [38]. Dans ce modèle, on cherche à minimiser le nombre de véhicules permettant de couvrir de façon satisfaisante la zone desservie. Toutefois, lorsque les véhicules sont affectés aux appels, il se peut que certaines zones ne soient plus couvertes adéquatement. Des décisions de relocalisation de véhicules doivent alors être apportées périodiquement pour maintenir une couverture correcte de la zone.

Ces modèles, malheureusement trop théoriques, ont considérablement évolué au cours des dernières années, motivés par le souci de mieux appréhender la réalité en cherchant à intégrer davantage de contraintes touchant à la couverture ou aux fluctuations dans les temps de parcours tout au long de la journée.

2.2. Problème de répartition dynamique

Le problème dynamique ajoute des éléments nouveaux qui augmentent les difficultés au niveau de la prise de décision lors de la détermination des itinéraires. Le problème consiste à concevoir les itinéraires des véhicules dans un mode en ligne où l'ensemble ou seulement une partie des données demeurent inconnus et sont révélées dynamiquement lors de l'exécution des routes. Ainsi, les itinéraires planifiés peuvent être redéfinis à plusieurs reprises tout au long de la période de service. Des temps de réaction beaucoup plus rapides sont donc nécessaires dans cet environnement dynamique.

La plupart des recherches dans ce domaine ont porté sur la relocalisation dynamique des véhicules de façon à tenir compte du dynamisme des appels et des réponses, mais en considérant le temps de parcours comme une constante (ex : [19], [39], [40], [41], [42]). Dans [40], Ibri *et al.* ont étudié l'effet de la résolution simultanée des problèmes de répartition et de relocalisation des véhicules d'urgence sur la qualité du service. Toutefois, les incertitudes liées au temps de

parcours ne sont toujours pas prises en compte puisque les auteurs se basent lors de la simulation sur des données de parcours statiques fournies par le logiciel MapPoint.

Malheureusement, ces hypothèses sur les temps de parcours sont peu réalistes en raison de l'évolution des conditions du trafic et des conditions météorologiques durant la journée. Ainsi, les solutions obtenues s'avèrent non optimales lors des heures de pointe étant donné que les temps de parcours considérés ne reflètent pas vraiment la réalité.

Des temps de parcours dynamiques ont été pris en compte dans quelques travaux de recherche liés au routage et à l'affectation des véhicules (ex. [28], [43], [44], [45], [46]). Goldberg *et al.* [47], par exemple ont utilisé des temps de déplacement stochastiques. Toutefois, la plupart des travaux n'ont pas pleinement intégré les changements dynamiques observés dans les temps de parcours au sein d'un réseau routier urbain. En effet, les temps de parcours sont généralement calculés à partir de données historiques. Ou alors, on divise la journée en intervalles de temps auxquels on affecte des coefficients différents, calculés sur la base des historiques de circulation, pour refléter la variation des temps de parcours selon les heures de la journée (en particulier, les heures de pointe).

Bien que cette méthode ait permis d'améliorer la qualité des solutions, les problèmes sur la route dus à des événements imprévisibles, tels que les congestions ou les accidents, restent toujours ignorés. Ainsi les solutions peuvent effectivement devenir obsolètes lorsqu'un événement imprévu se présente. Les solutions obtenues peuvent même devenir non réalisables et leur degré de non réalisabilité augmente avec la variabilité des conditions de circulation.

Taniguchi *et al.* [28] ont aussi souligné l'intérêt d'incorporer l'incertitude dans les temps de parcours pour réduire les coûts totaux et les impacts négatifs sur l'environnement.

La possibilité de rediriger un véhicule en mouvement vers une nouvelle demande à proximité a également reçu un intérêt limité (ex. [40], [41], [48], [49], [50]) malgré les gains supplémentaires qu'elle permet. Cet intérêt limité s'explique par le besoin de connaître en temps réel la localisation ainsi que l'état de chaque véhicule, en plus de la nécessité de communications rapides entre les véhicules et le centre de répartition.

Cette dernière lacune est presque résolue maintenant avec l'émergence des nouvelles technologies d'information et de communication et l'avènement des systèmes de transport

intelligents. L'information sur le trafic en temps réel devenant disponible, l'étude des problèmes de routage et de répartition dynamiques a repris avec beaucoup d'ampleur.

Les travaux actuels essaient de se rapprocher le plus possible des contingences du monde réel en se concentrant sur l'étude des problèmes en temps réel, souvent dans un contexte STI (ex. [9], [14], [36], [50], [51], [52], [53]).

Les travaux les plus pertinents pour notre étude, sont ceux de Haghani *et al.* [9], [14] et celui de Lopez *et al.* [54].

Dans Haghani *et al.* [9], [14], un modèle de simulation pour évaluer les interventions dans un système de véhicule d'urgences en temps réel est présenté (Figure 2-1). Le modèle utilise des informations en temps réel sur les temps de parcours en entrée et est conçu pour aider les centres de répartition dans l'optimisation de l'affectation des véhicules d'intervention et les orienter vers les itinéraires les moins encombrés. Par ailleurs, les temps de parcours considérés sont calculés à l'aide de mises à jour réelles périodiques jumelées à un modèle de prévision à court terme. La simulation est pilotée par des événements et des pas de temps fixes. Les événements réfèrent aux moments où un véhicule ou une urgence changent de statut. Les intervalles de temps fixes (10-15mn) réfèrent aux moments de mises à jour des informations sur le trafic. Ces intervalles ne sont pas être assez courts pour ne pas trop perturber le système et ne permettent pas ainsi une détection et réaction rapide aux événements.

Des solutions exactes minimisant le temps d'attente total sur un vaste réseau ont ainsi pu être obtenues en des temps de calcul raisonnables en faisant appel au module de répartition de véhicules du logiciel commercial CPLEX. Différentes stratégies d'affectation ont été évaluées avec le modèle de simulation, ainsi que des stratégies de diversion (pour servir des appels de plus haute sévérité) et de relocalisation de véhicules (pour améliorer la couverture de la flotte). Toutefois, les événements non récurrents ne sont pas considérés instantanément et leurs arrivées ne déclenchent pas de traitements ponctuels spécifiques.

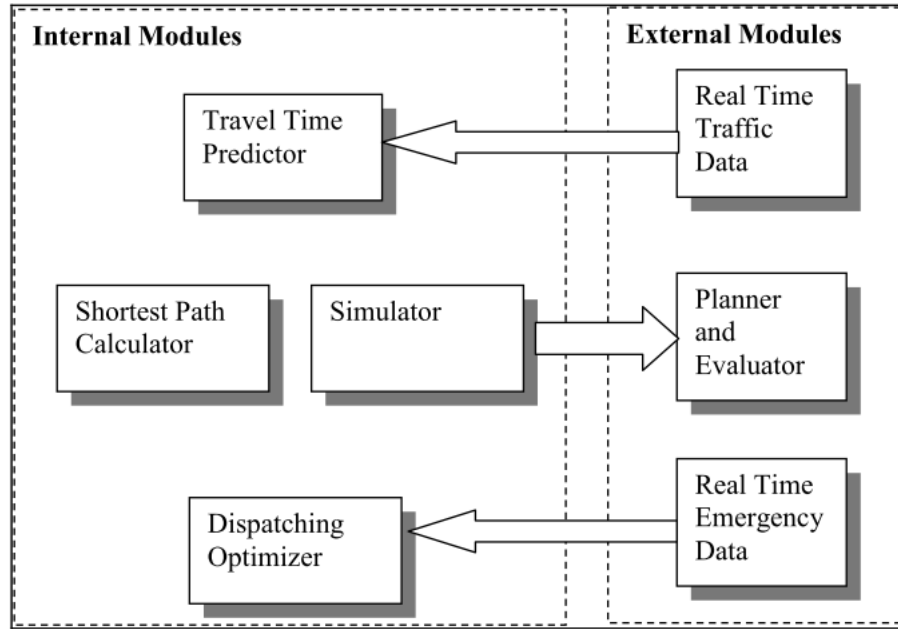


Figure 2-1 Structure du système de gestion de véhicules d'urgence (Haghani *et al.* [9])

Lopez *et al.* [54] ont utilisé un système multi-agents pour sélectionner l'ambulance à affecter à un patient. Le modèle proposé estime le temps requis pour effectuer un service en fonction de l'emplacement actuel de l'ambulance, la disponibilité de l'équipage et les conditions de circulation. Pour ceci, chaque agent véhicule intègre un module GPS, un module trafic, et un module de calcul de trajectoire. La station centrale est équipée d'un module GPS qui reçoit des entrées provenant du système GPS des agents véhicules et retourne l'emplacement de chaque ambulance. Le module trafic lit les informations sur les routes temporairement fermées en provenance du centre national de trafic. Le module de trajectoire contient une représentation du réseau de transport de la région. Chaque véhicule calcule l'itinéraire optimal, de son emplacement actuel à l'emplacement du patient, puis de cet endroit jusqu'à l'hôpital et enfin de l'hôpital à la station de base de l'ambulance, et envoie sa soumission au centre de répartition qui en choisira la meilleure.

Bien que, les calculs reposent sur les données actuelles ils ne reflètent pas l'impact sur le trafic d'événements non récurrents qui peuvent se présenter ainsi hormis leurs effets sur les variations des temps de parcours. Par ailleurs, les véhicules déjà en route ne peuvent pas être réaffectés pour servir d'autres demandes.

Une autre étude intéressante, mais qui ne traite pas de la gestion de véhicules d'urgence est présentée par Güner *et al.* [53]. Ici, une modélisation du trafic routier incluant la congestion récurrente et non récurrente est utilisée lors de la résolution du problème de tournées de véhicules en temps réel. Une idée importante dans ce travail est la surveillance récurrente des deux nœuds en amont de l'emplacement courant du véhicule (utilisation des informations en temps réel sur le temps de parcours sur ces tronçons) et la modélisation de l'état de la congestion sur les autres arcs du trajet avec des données probabilistes historiques. A chaque période de décision, le planificateur évalue des itinéraires alternatifs en se basant sur le temps prévu afin de parcourir le reste du trajet. Ceci permet un suivi assez efficace des véhicules tout au long de leur parcours au prix de traitements et de taux de communications plus intensifs.

Nous présentons maintenant dans ce qui suit une analyse des différents modèles de gestion de flottes de véhicules

3. Architecture de gestion des flottes de véhicules

Diverses architectures pour le routage et la répartition de véhicules ont été proposées dans la littérature. On peut les classer en deux grandes catégories selon qu'elles sont centralisées et décentralisées ou hybrides.

3.1. Architecture centralisée

C'est le modèle classique utilisé dans le monde réel. La prise de décision est effectuée exclusivement par le centre de gestion et transmise par la suite aux différents véhicules de la flotte. L'ensemble des demandes de service étant recueillies dans un même centre, elles sont ensuite affectées aux différents véhicules. La majorité des études dans la littérature adoptent cette architecture (ex. [9], [19], [29], [51], [55]). Toutefois, la mise en œuvre de cette architecture nécessite que tous les calculs soient faits par le centre de gestion.

Lors de la résolution du problème, on suppose que le centre de gestion connaît à chaque instant la localisation, l'état et la destination de tous les véhicules ainsi que l'état de la circulation en temps réel. Bien que les technologies modernes puissent fournir ce genre d'informations, les algorithmes d'optimisation ne permettent pas toujours une réponse rapide aux situations d'urgence, surtout lorsque le territoire desservi est grand et la fréquence des appels est importante. En plus, une architecture centralisée peut être sensible aux mises à jour de l'information. Dès lors, même une mise-à-jour mineure de l'information peut avoir un impact sur

de nombreux véhicules, à moins de pouvoir procéder à une ré-optimisation localisée seulement aux régions ou véhicules affectés.

3.2. Architecture décentralisée

Le dynamisme qui caractérise les problèmes de tournées de véhicules dans le monde réel a conduit récemment au développement de techniques de résolution distribuées. Certains travaux ont adopté une stratégie totalement décentralisée, reposant sur des calculs répartis et des technologies sans fil (ex [56], [57], [58]). L'idée ici est d'attribuer une certaine autonomie aux véhicules afin de partager la charge de calcul entre toutes les entités du système (ex. les véhicules, le centre de gestion, etc.) pour une meilleure coordination et prise de décision.

Cette stratégie repose sur un système multi-agents (SMA) où le système est composé de plusieurs unités logicielles intelligentes interagissant entre elles (agents) qui sont associées à des entités physiques ou fonctionnelles (par exemple des véhicules). Les agents sont en mesure d'agir de façon autonome en poursuivant leurs propres intérêts. Même si chaque agent n'a qu'une vue partielle et locale du système, les agents peuvent interagir les uns avec les autres, par exemple en échangeant de l'information ou en négociant entre eux. L'architecture multi-agents semble être une solution prometteuse pour les systèmes distribués, puisqu'elle offre une grande flexibilité. Une question clé est de savoir comment configurer les différents agents de façon à ce que leur comportement produise une solution globalement satisfaisante.

L'idée à la base des SMA est élégante et a été appliquée dans de nombreuses applications réelles, comme les jeux informatiques, les technologies mobiles, le transport, la logistique, etc. Toutefois, la littérature sur l'application des SMA dans le contexte de la gestion des véhicules d'urgence est rare. Pour cette raison, nous considérons son application dans le contexte général des problèmes de tournées de véhicules.

Dans [56], [57], les auteurs ont étudié les effets de la prise de décisions autonomes de chaque véhicule de transport quant au choix des routes et des demandes à desservir. Les véhicules sont perçus comme des entités autonomes capables d'interagir et de se coordonner pour déterminer leurs routes et choisir les demandes à desservir de manière autonome tout en réagissant aux changements dynamiques dans leur environnement. Ici, le plan de routage n'est plus évalué et calculé par un centre de décision, mais plutôt par les différents véhicules de la flotte eux-mêmes, où chacun utilise une mesure de récompense pour guider leurs choix.

Dans cette même optique, les auteurs dans [58] proposent une approche où chaque véhicule dispose d'un système GPS et est connecté à un système d'informations sur le trafic routier. Ceci lui permet de calculer le coût d'insertion d'une nouvelle demande dans sa route puis d'échanger son coût estimé avec les autres véhicules de telle sorte que celui offrant le service à meilleur coût sera élu pour servir la demande. Ainsi, le temps de calcul se réduit au temps de réévaluation des routes par chacun des agents séparément.

Le nombre de messages échangés augmente toutefois exponentiellement avec le nombre de demandes. C'est un problème important vu la limitation des ressources sans fil. Il faut aussi considérer le risque de perte ou de chevauchement des messages et les problèmes de diffusion.

3.3. Architecture hybride

Ce modèle propose une meilleure coordination entre les entités du système pour maintenir le plus possible une solution globale satisfaisante. Cette approche réduit la complexité des communications en coordonnant seulement les agents responsables de la prise de décision (donc, sans avoir recours à une complète communication inter-agents).

Zeddini *et al.* [59], [60] proposent une approche basée sur un mécanisme de vente aux enchères. Le centre de gestion envoie une demande de service aux véhicules de la flotte. Ces derniers, dès la réception d'une nouvelle demande, calculent le coût de son parcours avant et après l'insertion du client à l'aide d'une heuristique simple. La différence de coût (l'effort supplémentaire) correspond à la soumission qui est envoyée à l'agent central. L'agent qui reçoit les soumissions (le centre de gestion) compare les réponses reçues des différents véhicules, les classifie et envoie un message de diffusion avec l'identité du véhicule choisi pour servir la demande.

Lopez *et al.* [54], ont utilisé un SMA pour sélectionner l'ambulance à affecter à un patient. Le modèle proposé traite seulement les demandes urgentes et inclut un agent de confiance qui indique au centre de décision dans quelle mesure le temps de parcours estimé par chaque véhicule dans sa soumission est réaliste, en se basant sur l'expertise des conducteurs. Ceci est fait en combinant un protocole de type vente aux enchères avec un modèle de confiance et de filtres flous (fuzzy filters) qui évalue l'expertise du conducteur. Les problèmes d'affectation et de couverture sont résolus conjointement afin d'identifier le véhicule choisi pour répondre à la demande.

Ibri *et al.* [42], ont développé une approche hybride (Figure 2-2) pour la résolution dynamique du problème d'affectation et de relocalisation des véhicules d'urgence. Deux approches multi-agents ont été proposées. La première approche est un processus de décisions en deux étapes qui traite d'abord le problème d'affectation, puis le problème de couverture et de relocalisation des véhicules. Les données et les contrôles sont distribués en considérant des interactions limitées entre les agents. La deuxième approche est basée sur une coordination implicite des agents basée sur un mécanisme d'enchères plus raffiné pour résoudre simultanément l'affectation et la relocalisation des véhicules. Différents objectifs (temps de réponse, pénalités pour les demandes insatisfaites, pénalités pour les zones non couvertes, pénalités de déviation du parcours du véhicule) sont considérés lors de la soumission de chaque agent véhicule.

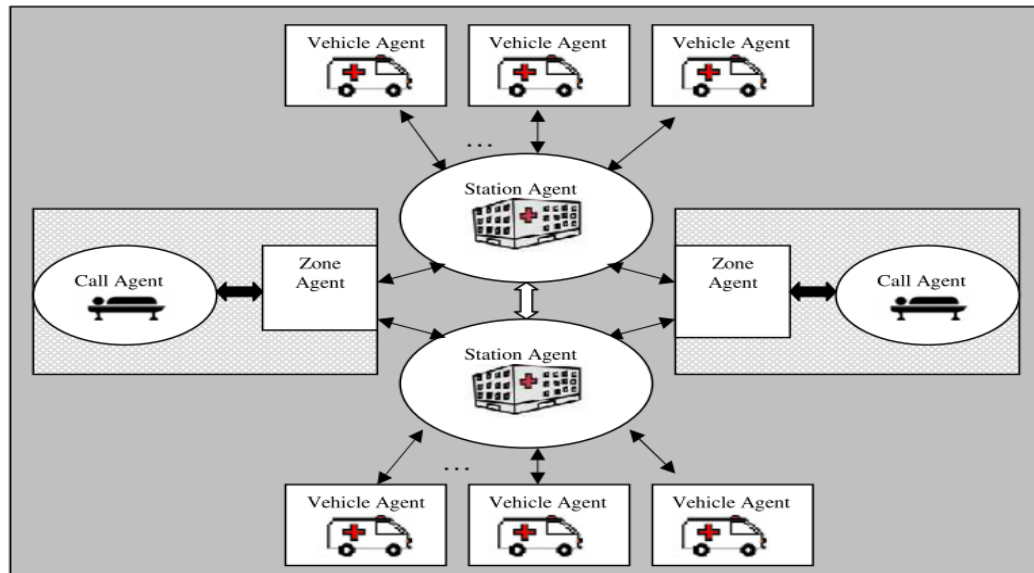


Figure 2-2 Architecture multi-agent pour la gestion de véhicules d'urgence (Ibri *et al.* [42])

La restriction des soumissions aux seuls agents ayant un potentiel de réponse reste toutefois non abordée, une méthode intéressante d'auto-organisation d'un système multi-agents est proposée dans [61]. Le but est de restreindre la réception des demandes de service aux véhicules pouvant effectivement les satisfaire. Pour ce faire, on fait appel au concept de l'écoute flottante : chaque agent véhicule de la flotte associe à un sous-ensemble de nœuds du réseau un intervalle qui définit les moments où il peut se retrouver à l'un de ces nœuds, ce qui définit sa zone d'action ou de couverture. Le graphe G représentant le réseau routier est dupliqué T fois, où chaque copie représente l'état du graphe à un instant donné. Ainsi lorsqu'un véhicule v se trouve

au nœud i à l'instant t il installe un écouteur sur le nœud i du graphe G_t . Cet écouteur lui permet d'être notifié des événements survenant au niveau de ce nœud. Ceci signifie aussi que le véhicule v est susceptible d'être au nœud i à l'instant t . Cette idée est très bénéfique dans le contexte des véhicules d'urgence puisqu'il devient plus facile de garder trace des emplacements et zones de couverture de chaque véhicule, le nombre de ces emplacements étant limité.

Cette architecture est particulièrement souhaitable dans le cas de la gestion des véhicules d'urgence puisque l'intégration des problèmes d'affectation et de couverture complique le passage à la solution distribuée. En fait, étant donné que chaque véhicule a accès seulement à une portion limitée des informations, la décision qu'il prend est locale. Faute de la présence d'un agent de coordination, ce processus peut conduire à une situation chaotique, car les décisions prises au niveau local peuvent être contradictoires ou du moins non optimales au niveau global.

3.4. Architecture reconfigurable

D'autres travaux de recherche ont opté pour une structure de reconfiguration dynamique comme solution aux changements dans l'environnement qui peuvent affecter la qualité des solutions produites. Cette reconfiguration dynamique consiste à modifier le système durant son exécution en ajoutant, en remplaçant ou en retirant un ou plusieurs de ses composants. Cette adaptation architecturale est parfois préférable dans un contexte d'environnement incertain à une seule architecture en réduisant la complexité des traitements nécessaires pour s'ajuster aux événements.

Benyahia et Potvin [33] ont présenté un cadre réutilisable pour des applications complexes requérant un système de gestion sous contraintes temporelles. Ce cadre est basé sur une architecture distribuée reconfigurable avec des composants qui présentent un comportement capable de s'adapter aux exigences spécifiques d'applications complexes. Un exemple pour la répartition dynamique de véhicules est présenté avec quelques scénarios de reconfiguration pour faire face à des événements imprévus.

Dans [22], la programmation génétique est utilisée pour identifier la configuration dynamique optimale d'une architecture pour des applications complexes qui interagissent avec des environnements imprévisibles. L'approche génétique est utilisée pour sélectionner la meilleure solution parmi une vaste gamme de solutions de traitement possibles définies à partir d'une bibliothèque de composants.

Pour récapituler, les travaux d'Ibri *et al.* [42] et Zeddini *et al.* [59] semblent prometteurs pour notre travail. En effet, cette solution hybride semble plus convenable qu'une stratégie centralisée ou totalement distribuée, car il devient possible de mieux adapter le système à l'arrivée d'événements dynamiques. Aussi, elle permet d'alléger les calculs au centre de répartition et aux véhicules, de limiter le flux des communications et de réduire le temps de calcul nécessaire. En outre, l'idée d'auto-organisation dans [61] ouvre une perspective pour limiter le flux des communications et les traitements en les restreignant aux candidats potentiels seulement. Toutefois, vu les fortes incertitudes sur le réseau routier, les contraintes temporelles et la complexité de la gestion qui en découlent, une simple adaptation du système n'est parfois pas suffisante. L'idée d'architecture adaptative introduite dans [33] semble mieux adaptée à notre contexte puisque ce ne sont pas toutes les entités du système qui sont remises en question lors de l'optimisation.

Ceci remet en cause la technique de résolution à déployer au sein des entités de traitement, surtout au niveau du centre de gestion, qui reste un point clé du succès d'une telle approche. En effet, la technique de résolution est à la base de la qualité des solutions fournies et définit le degré de réactivité par rapport aux changements dans l'environnement. C'est sur ce point qu'on s'intéressera dans la prochaine section.

4. Approches de résolution pour le VRP

Diverses approches ont été déployées pour résoudre le problème de tournées de véhicules et ses différentes variantes. Les performances obtenues varient selon la complexité du problème posé et la méthode déployée. Dans cette section, nous proposons une vue d'ensemble sur les méthodes de résolution pour le VRP. Notre but est de les analyser par rapport à notre problématique et faire ressortir les méthodes les plus pertinentes et les mieux applicables à notre contexte. On commencera par donner un aperçu de leurs principes de base.

4.1. Un aperçu sur le principe de base des méthodes de résolution

Le problème de tournées de véhicules a été résolu par des méthodes exactes et des méthodes approchées.

4.1.1. Méthodes exactes

Les méthodes exactes, par exemple l'algorithme de séparation et évaluation (Branch & Bound), permettent de trouver la solution optimale d'un problème d'optimisation en explorant

exhaustivement l'ensemble des solutions ou configurations possibles [62]. L'exploration énumérative (toutes les solutions sont évaluées une à une) est la technique la plus basique. Certaines méthodes exactes requièrent aussi une fonction objectif présentant des caractéristiques particulières, comme la stricte convexité, la continuité ou encore la dérivabilité [62]. Les algorithmes de résolution exacts, étant de complexité exponentielle, restent inappropriés pour les problèmes en temps réel. Il est généralement plus judicieux de faire appel à des méthodes approchées.

4.1.2. Méthodes approchées

Contrairement aux méthodes exactes, les méthodes approchées sont incomplètes dans la mesure où elles permettent de trouver de bonnes solutions, mais ne garantissent en aucun cas l'optimalité de celles-ci. En effet, ces méthodes fournissent rapidement (en temps polynomial) une solution réalisable, pas nécessairement optimale, pour des problèmes d'optimisation NP-difficiles. Les méthodes approchées comprennent des heuristiques et des méta-heuristiques.

Vu la complexité du problème étudié, les méthodes approchées semblent les mieux adaptées à notre problématique. Toutefois, la gestion en temps réel d'une flotte de véhicules demande une ré-optimisation dynamique de la solution courante. Il est donc nécessaire de concevoir des systèmes qui permettent aux décideurs de trouver non seulement des solutions optimisées, mais également robustes face à l'incertitude et aux fluctuations de l'environnement et ceci dans des temps de calcul satisfaisants.

Nous étudierons donc le comportement et l'efficacité des méthodes déployées face au dynamisme de l'environnement. À cette fin, nous commençons par donner un aperçu sur les procédures d'optimisation dynamiques.

4.2. Un aperçu sur l'optimisation dynamique

L'optimisation dynamique consiste à déterminer une nouvelle solution en réaction aux variations de l'environnement. Plus spécifiquement, on cherche à optimiser des fonctions objectifs qui varient au cours du temps. Ces problèmes soulèvent des difficultés spécifiques, du fait qu'il faut approcher au mieux la meilleure solution à chaque pas de temps.

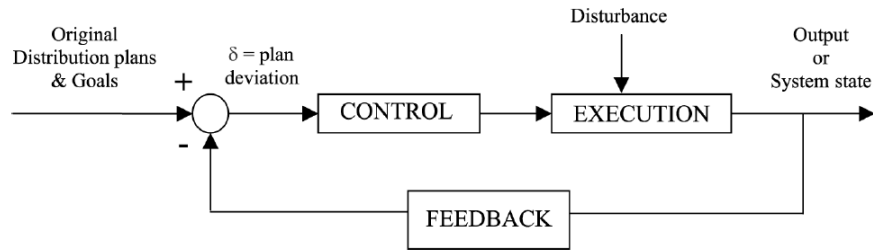


Figure 2-3 Modélisation d'une résolution périodique du problème de routage temps réel [19]

Formellement, l'optimisation dynamique vise à déterminer une solution de bonne qualité pour le problème modifié en contrôlant l'amplitude du changement entre la solution au problème modifié et la solution en cours d'exécution (Figure 2-3).

Les points importants relatifs à ce problème ont été scindés en deux groupes dans [19]: l'un se concentre sur la modélisation du système et l'autre sur la réduction de la complexité du modèle.

- La modélisation du système inclut les points suivants:

- Observation du système : ceci concerne la sélection des paramètres à surveiller comme la position du véhicule, sa vitesse, etc. ce qui permettra de réagir rapidement aux événements imprévisibles.
- Type d'intervention : il s'agit du choix entre un ajustement global de tout le plan de routage, entraînant une optimisation plus complète au prix d'une perturbation de tout le système et des temps de calcul supplémentaires versus un ajustement local plus efficace à l'aide d'algorithmes qui retouchent les parties affectées seulement.
- Les objectifs: ils diffèrent d'un problème à l'autre; ils peuvent concerner la réduction des coûts, la minimisation des déviations par rapport au plan original ou la minimisation des risques. Dans notre cas, il s'agit de la minimisation du temps de réponse.

- La réduction de la complexité du problème et des temps de calcul est primordiale pour fournir une solution qui répond aux exigences du temps réel.

L'ajout de contraintes sur les changements admissibles et l'introduction de pénalités dans la fonction objectif sont les deux principaux mécanismes utilisés pour limiter l'amplitude du changement entre deux solutions et ainsi assurer leur stabilité.

Dans [63], l'auteur classe les approches dynamiques selon qu'elles sont réactives, proactives ou de type « clustering ». Dans ce qui suit, nous présentons les approches proposées en fonction de ces critères.

4.3. Approches de résolution utilisées dans la littérature

Les problèmes de tournées de véhicules en temps réel utilisant les informations fournies par les STI nécessitent une prise de décisions en ligne. Un ingrédient clé est l'efficacité de calcul, qui suppose un bon compromis entre la réactivité et la qualité de la solution fournie. En effet, le temps investi dans la recherche d'une meilleure décision se fait au prix d'une moindre réactivité aux changements et inversement. Nous analyserons dans la suite les méthodes les plus récemment utilisées dans un contexte dynamique et/ou STI.

4.3.1. Optimisation périodique ou réactive

Ce sont des méthodes qui réagissent au changement. Le principe général de ces méthodes est d'effectuer une action lors de la détection d'un changement.

L'approche classique considère que chaque changement engendre un nouveau problème d'optimisation qui doit être résolu à nouveau à partir de zéro, une sorte de ré-optimisation périodique réactive (ex. [14], [9], [19], [36], [52]). La majorité de ces approches sont basées sur des algorithmes précédemment développés pour des problèmes statiques, pour lesquels de vastes recherches ont déjà été conduites, tels les algorithmes génétiques, les systèmes de colonies de fourmis, etc. Ainsi, à chaque mise-à-jour, le problème courant est ré-optimisé afin d'obtenir une nouvelle solution. Cette approche peut être coûteuse en temps de calcul et reste inexploitée entre les mises à jour. En augmentant la fréquence de ces mises à jour, afin d'obtenir des données plus précises et mieux détecter tout changement, la qualité de la solution fournie a tendance à se détériorer en raison du temps de calcul trop court accordé à l'optimisation. Ainsi, bien que cette approche soit simple, elle est souvent inapplicable dans un contexte où les contraintes de temps sont serrées.

Parfois, la ré-optimisation n'est autorisée qu'à certains moments prédéfinis (par exemple, à chaque minute), de telle sorte qu'un nouvel événement n'est pas traité immédiatement, mais seulement au moment autorisé (ex. [29], [52], [59], [64]).

Une approche réactive intéressante est présentée dans [65]. Une méthode de type glouton (« greedy ») et une recherche taboue sont utilisées pour la résolution du problème de répartition

et de relocalisation des véhicules d'urgence en temps réel. La répartition et la relocalisation sont considérées simultanément en fonction de la priorité des appels d'urgence. La simulation est pilotée par les événements et par des pas de temps fixes. Les événements correspondent aux moments où le véhicule change de statut (ex. de véhicule en service à véhicule libre) et où la situation d'urgence change de statut (ex. nouvelle demande, demande servie). Les incréments de temps fixes réfèrent aux moments où la mise-à-jour des informations sur le trafic est effectuée, a priori toutes les 5 minutes. Les solutions initiales sont générées avec un algorithme glouton (« greedy search »). La recherche taboue est relancée chaque fois qu'un événement arrive où que le pas de temps soit incrémenté. Des diversions et des modifications aux routes des véhicules sont considérées à chaque ré-optimisation si un gain au-delà d'un certain seuil est obtenu. Toutefois, les mises à jour périodiques des temps de parcours ne permettent pas de faire face rapidement à des événements imprévus. Ainsi, un autre module de gestion de risque doit être mis en place pour gérer plus rapidement ces événements et décider des meilleures actions à entreprendre.

Dans un contexte similaire, Ibri *et al.* [41], [40] ont développé une solution centralisée parallèle pour la résolution simultanée du problème de répartition et de relocalisation des véhicules d'urgence en combinant une colonie de fourmis et une recherche taboue. Ils ont considéré un système de type maître-esclaves où, à chaque itération de l'algorithme, le processus maître lance n processus esclaves. Chaque processus esclave répète les étapes de construction de solutions et de mise-à-jour locale de la phéromone pour toutes les fourmis qui lui ont été attribuées. Pour construire une solution, chaque fourmi choisit itérativement une demande i (appel d'urgence) et lui affecte un véhicule j avec une probabilité P_{ij} . Par la suite, le processus maître récupère la meilleure solution et y applique une recherche taboue parallèle avant de faire une mise-à-jour hors ligne de la phéromone et lancer la prochaine génération de fourmis. Dans ce travail, seules les nouvelles demandes sont prises en compte et les temps de parcours sont considérés comme constants.

Montemanni *et al.* [66] ont développé un système de colonies de fourmis (ACS ou « Ants colony system ») pour résoudre le problème dynamique de tournées de véhicules. Les auteurs proposent de transférer les caractéristiques d'une bonne solution d'une période d'optimisation à la suivante en récupérant les traces de phéromones.

Pillac *et al.* [67] ont proposé une approche réactive rapide de ré-optimisation basée sur une exécution en parallèle de la méthode de recherche adaptative à voisinage large (pALNS « parallel Adaptive Large Neighborhood Search ») toujours pour un problème de tournées dynamique. Cette approche permet de produire des solutions de grande qualité dans un temps de calcul limité. L'approche consiste à utiliser pALNS pour produire une solution initiale au début de la journée, puis de l'exécuter pour un nombre limité d'itérations chaque fois qu'une nouvelle demande de service apparaît. Elle maintient aussi en mémoire un ensemble de solutions prometteuses qu'elle exploite lors de la ré-optimisation. Là aussi, seules des demandes qui arrivent dynamiquement sont considérées. Les temps de parcours sont calculés en utilisant des historiques de circulation seulement. Toutefois, l'idée d'exécuter l'algorithme un nombre limité de fois pour accélérer les temps de réponse tout en gardant des solutions prometteuses en mémoire est intéressante.

4.3.2. Optimisation continue ou proactive

Dans cette méthode, appelée aussi méthode de maintien de la diversification, on essaie de maintenir une certaine diversité de solutions en espérant que, à chaque fois que la fonction objectif est modifiée, la répartition des solutions dans l'espace de recherche permettra de retrouver rapidement un nouvel optimum.

Pour ceci, une optimisation est réalisée en boucle tout au long de la journée et les bonnes solutions sont stockées dans une mémoire adaptative. Ces dernières seront utilisées ultérieurement pour produire de nouvelles solutions. L'avantage d'une telle optimisation continue est une utilisation maximale de la puissance de calcul au prix toutefois d'une lourde mise en œuvre.

Dans [68], les auteurs ont proposé un simulateur pour la résolution du problème dynamique de tournées de véhicules avec contraintes d'intervalles de service (RT-VRPTW « Dynamic Vehicle Routing Problem with Time Windows »). Le simulateur proposé est formé de deux composants qui coopèrent entre eux. D'abord, un composant Algorithme Génétique (AG) cherche à améliorer en continu la population de solutions courante. Ensuite, un composant gestionnaire d'événements (GE) détecte l'arrivée des événements et déclenche les actions appropriées pour répondre à cet événement (insertion de nouvelles demandes, mise-à-jour des temps de parcours, arrivée d'un véhicule chez un client, etc.). L'idée est de réutiliser les

anciennes solutions pour générer de nouvelles solutions qui tiennent compte des nouvelles demandes. Les prévisions de temps de parcours recourent à un modèle de lissage exponentiel afin de se rapprocher le plus possible des conditions de trafic réel. Toutefois, bien que les algorithmes génétiques soient connus pour produire de bons résultats, ils sont relativement lents et nécessitent des calculs intensifs. Ils ne sont donc pas véritablement adaptés à notre contexte. Aussi, bien que les prévisions soient une source importante d'informations, elles ne suffisent pas pour faire des traitements en temps réel.

Dans un contexte dynamique plus général, Li et Yang [69], ont proposé d'utiliser un mécanisme de suivi des optimums locaux. L'algorithme d'optimisation utilise les essaims de particules (« Particle Swarm Optimization » ou PSO) comme méthode de recherche pour identifier les optimums locaux les plus prometteurs dans l'espace des solutions. L'idée est de diviser l'espace de recherche : un essaim parent emploie une méthode de recherche globale pour détecter les sous-régions prometteuses et ensuite une méthode de regroupement hiérarchique pour générer un nombre approprié de sous-essaims. Chaque sous-essaim enfant explore donc un sous-espace de recherche afin d'y trouver un optimum local. Lorsqu'un changement survient dans l'environnement, chaque sous-essaim peut alors converger rapidement vers un optimum local. Cette idée est prometteuse dans un contexte de traitement centralisé, mais demande un paramétrage adéquat pour obtenir de bonnes solutions.

4.3.3. Optimisation hybride

L'idée ici est de combiner les méthodes proactive et réactive pour une meilleure résolution du problème.

Greenwood *et al.* [51] ont présenté un logiciel commercial de planification pour le transport (LS/ATN) utilisant les données en temps réel recueillies de technologies envahissantes (on-board units, GPS, etc.). Le planificateur se base sur une architecture multi-agents centralisée utilisant une heuristique d'insertion séquentielle. La solution est optimisée en échangeant les demandes entre les routes, suite à des négociations entre les agents. En parallèle, on propose une stratégie proactive, soit une simulation en arrière-plan où des routes alternatives, basées sur des données en temps réel, des prévisions et des estimations probabilistes, sont calculées et utilisées pour aider à la prise de décision.

Une autre approche intéressante est présentée dans [70]. Une méthode hybride est considérée pour la résolution du problème de répartition de véhicules à grande échelle et en temps réel (LRVDP) faisant appel à une recherche taboue. L'algorithme utilise une liste de candidats pour restreindre les mouvements vers des solutions prometteuses seulement. On retrouve également une stratégie d'oscillation dynamique, qui est réalisée par un mécanisme d'ajustement des paramètres de la recherche taboue, afin d'explorer plus efficacement l'espace des solutions. Bien que la recherche taboue soit assez gourmande en temps de calcul, requérant parfois de nombreuses itérations avant d'obtenir des solutions satisfaisantes, la liste de candidats a permis de déterminer de bonnes solutions dans des temps de calcul relativement courts. Cette méthode semble prometteuse dans le contexte des véhicules d'urgence où une liste de véhicules candidats peut être facilement générée selon des critères de temps de réponse ou de couverture.

5. Le problème du plus court chemin dynamique

Pour résoudre un problème dynamique de tournées ou de répartition de véhicules, il faut évidemment être en mesure de calculer les temps de parcours d'un point à un autre dans le réseau routier. À la différence du problème du plus court chemin classique où le temps de parcours d'un sommet origine à un sommet destination est supposé constant, celui-ci varie dans un réseau routier selon diverses variables, en particulier le moment de la journée (« Time Dependent Shortest Path problem ou TDSP»). Cette dépendance au temps des temps de parcours fait en sorte que ceux-ci n'obéissent plus nécessairement à la règle logique qui veut qu'au segment le plus court corresponde le temps de parcours le plus court. Il peut aussi arriver que des changements imprévisibles se produisent sur le réseau, ce qui crée un problème du plus court chemin dynamique (« Dynamic Shortest Path problem » ou DSP).

Nous considérons dans la suite les algorithmes du plus court chemin qui ont été développés dans ces contextes et abordons également certains modèles de prévision à court terme pour les temps de parcours.

5.1. Les algorithmes du plus court chemin

Lorsque le temps de déplacement est relativement stable, les algorithmes de plus court chemin classiques peuvent produire une solution acceptable (par exemple, Dijkstra, A*, etc.). L'algorithme A* intègre une heuristique dans la procédure de recherche. Au lieu de choisir comme prochain sommet celui qui se trouve à une distance minimale du sommet de départ, ce choix est également basé sur une estimation heuristique de la proximité au sommet destination.

Ceci permet de réduire considérablement l'espace de recherche et de produire des résultats plus rapidement.

Hall [71] a toutefois prouvé que les algorithmes de plus courts chemins statiques ne sont pas applicables au problème avec temps de parcours variables ou dynamiques. Pour profiter d'informations en temps réel sur le trafic, il est nécessaire d'utiliser des algorithmes plus sophistiqués. Ces derniers sont malheureusement NP-complets, mais en considérant l'hypothèse FIFO (aussi appelée propriété de non-dépassement), il est possible de produire des solutions en un temps polynomial [72]. En règle générale, les réseaux de transport terrestre appartiennent à cette catégorie.

Très souvent, l'évolution des temps de parcours en fonction du temps correspond à une fonction linéaire par morceaux qui conduit à des temps de calcul plus longs et à une demande plus élevée en mémoire [72]. C'est pourquoi de nombreux auteurs justifient l'utilisation de solutions approchées, basées sur une discrétisation du temps. En effet, générer des solutions exactes en temps continu ne serait envisageable que dans un environnement de calcul parallèle [72]. Dans la suite, nous ne considérerons donc que les solutions en temps discret.

Dans la pratique, plusieurs approches pour résoudre les problèmes de plus courts chemins dépendants du temps ont été proposées dans la littérature. Beaucoup d'approches sont des dérivées de l'algorithme de Dijkstra. Toutefois, seules quelques-unes fonctionnent dans un contexte dynamique. Dreyfus [73] a proposé une généralisation de l'algorithme de Dijkstra pour résoudre le TDSP pour une heure de départ donnée toutefois, contrairement au problème classique, les études sur le TDSP sont moins riches. Au cours des dernières années, il y a eu peu d'avancées significatives dans la résolution du problème dans un environnement temps réel. Une question difficile est donc de développer des algorithmes efficaces avec le minimum de calculs dans des contextes dynamiques.

Chabini [74] a proposé un algorithme efficace pour obtenir une solution approchée au problème du plus court chemin dans un contexte dynamique. Pour ce faire, le réseau original est explosé selon k intervalles de temps uniformes, ce qui permet de résoudre le DSP comme un problème statique dans le réseau explosé. Toutefois, la différence entre le LTT (« least total travel time » LTT) obtenu et le LTT optimal est très sensible au paramètre k contrôlant la discrétisation du temps.

Étant donné que l'heuristique A^* fournit généralement de bons résultats pour le problème statique, il y a eu plusieurs tentatives d'adaptation de cet algorithme pour le problème où les temps de parcours dépendent du temps. Zhao et Ohshima [75] ont réduit le temps de calcul au prix d'un coût de prétraitement supplémentaire. L'algorithme proposé est basé sur une généralisation de l'algorithme A^* combiné avec l'algorithme ALT, proposé par Goldberg et Harrelson [76]. L'idée principale d'ALT est d'utiliser des points de repère pré-calculés pour déterminer les distances à certains sommets intermédiaires. Comme il peut devenir rapidement exorbitant de maintenir les valeurs associées à plusieurs points de repère, des méthodes d'échantillonnage dans le temps sont proposées. Évidemment, cette approche ne permet pas de tenir compte de changements rapides dans les données.

Dans [77], Jigang *et al.* proposent une approche intéressante qui fournit une bonne approximation au DSP. L'idée est d'utiliser le plus court chemin statique pour identifier une zone d'intérêt et appliquer ensuite l'algorithme pour le TDSP sur le sous-réseau en question afin d'affiner la solution. On évite ainsi beaucoup de calculs inutiles. La taille du sous-réseau exploré peut être modulée selon la période de trafic pour une meilleure qualité de solution. Cette méthode a ainsi permis un gain de 90% en temps d'exécution.

5.2. Les modèles de prévision du temps de parcours

Dans la réalité, les informations sur le trafic dans les rues locales ne sont généralement pas disponibles. Même pour les artères, les informations sur le trafic ne sont mises à jour qu'à différents intervalles de temps. Une alternative à cette situation est d'utiliser des données historiques pour estimer le temps de parcours sur les rues locales et d'appliquer ensuite des techniques de prévision.

Plusieurs modèles de simulations ont été développés pour la prédiction de temps de parcours (STM, DYNASMART, etc.) mais ceux-ci ne supportent pas le traitement en ligne.

Récemment, des modèles de prévision basés sur des réseaux de neurones artificiels ont été utilisés pour les prévisions à court terme ([1], [21]).

Dans un problème de guidage dynamique, Feng *et al.* [1] ont proposé une approche de prévision de vitesse à court terme basée sur un réseau de neurones à rétro propagation en faisant appel à la fois à des informations historiques et en temps réel pour la période d'apprentissage. Un

Le poids plus important est associé aux données actuelles par rapport aux données historiques puisqu'elles ont une influence plus grande sur les prévisions.

6. Conclusion des discussions sur les approches existantes

Plusieurs contraintes doivent être prises en considération lors de la conception d'une approche de résolution adéquate pour le problème de répartition de véhicules d'urgence. Il est difficile de formaliser ce problème dans un environnement incertain à l'aide de modèles mathématiques ou de règles de décision explicites (ex. [35], [78], [79]). Cette difficulté est due à la multiplicité des facteurs à considérer pour obtenir une solution satisfaisante dans des temps de calcul acceptables.

Plusieurs méthodes de résolution existent pour les problèmes de tournées et de répartition de véhicules rapportés dans la littérature. Étant donné le dynamisme du réseau routier, il est nécessaire de prendre en considération les variations des temps de parcours et les ajustements à la solution courante qui en découlent.

Nous reprenons ici les trois facteurs clés et interdépendants, qui influencent la qualité de la solution fournie.

Tout d'abord, l'architecture de résolution. En étudiant les diverses architectures rapportées dans la littérature à la section 3, nous avons noté que le modèle décentralisé est parfois souhaitable pour la gestion d'une flotte de véhicules, compte tenu de la nature distribuée du problème. En effet, les différents composants sont répartis géographiquement.

Une architecture hybride comme celle présentée dans [42] et [59] est désirable dans un contexte de gestion de flottes de véhicules d'urgence, car elle respecte la nature distribuée du problème et facilite sa compréhension et sa mise en œuvre. Aussi, les différentes composantes du système auront à prendre des décisions moins complexes et seront en mesure de mieux contrôler leur environnement local et ainsi réagir plus rapidement aux changements, en particulier dans un contexte STI.

Une question clé est la configuration des agents de telle façon que leur comportement mène globalement à une solution quasi-optimale. La coordination et l'échange d'informations entre les agents définissent la pertinence de l'approche distribuée afin d'atteindre les performances requises. L'idée d'une architecture reconfigurable telle qu'introduite par Benyahia

et Potvin [33] semble plus adéquate pour gérer les traitements de ré-optimisation, puisque ce ne sont pas toutes les entités du système qui sont remises en question lors des réoptimisations et que ce ne sont pas toujours les mêmes. Une architecture reconfigurable qui sélectionne les entités et les traitements dépendamment du contexte semble mieux adaptée qu'une architecture statique reposant sur des traitements plus complexes.

L'idée d'auto-organisation selon la couverture, introduite par de Zargayouna [61], semble aussi intéressante afin de mieux limiter le flux des communications et de réduire les calculs nécessaires à un sous-ensemble de véhicules candidats. On retiendra ces idées afin de les adapter à notre problème.

Le deuxième facteur clé est l'approche de résolution. Dans un contexte de traitement en temps réel, tous les mécanismes d'adaptation doivent être à la fois rapides et bornés dans le temps. Ceci inclut les mécanismes de décision et/ou de reconfiguration. Les approches discutées tout au long de ce chapitre présentent différents degrés de reconfiguration et d'adaptation. Les plus pertinentes sont récapitulées dans le tableau comparatif ci-dessous (Tableau 2).

L'approche de résolution proactive ou hybride comme celle rapportée dans Greenwood *et al.* [51] semble difficile à implémenter dans notre contexte puisque nous faisons face à des événements imprévus et aléatoires dont on ne peut prévoir ni l'emplacement ni le temps d'occurrence, en plus du temps limité dont on dispose pour l'adaptation et la mise en œuvre. Par contre, l'approche de résolution réactive s'avère une bonne candidate dans notre cas, même s'il est nécessaire de ré-exécuter l'algorithme à nouveau à chaque changement. Les approches de résolution présentées par Yang [65] et Pillac *et al.* [67] semblent aussi être intéressantes dans notre contexte, vu le degré de réactivité et l'efficacité de calcul qu'elles permettent.

Le travail de Pillac *et al.* [67] repose sur le maintien en mémoire d'un ensemble de solutions prometteuses qui sont utilisées lors de la ré-optimisation. Bien que cette approche permette un gain potentiel de temps, elle nécessite aussi la mise-à-jour de toutes ces solutions à chaque cycle de ré-optimisation. Il reste que de faibles perturbations de l'environnement n'affecteront pas tous les éléments d'une solution, de telle sorte que la solution modifiée ne diffèrera pas trop de la solution originale. Il devient alors possible de limiter la ré-optimisation aux seuls traitements nécessaires, sans qu'il y ait nécessité de réévaluer l'ensemble d'une solution. L'approche gloutonne de Yang [65] présente de bonnes performances, surtout si elle est

limitée à quelques candidats seulement choisis selon la zone d'action (tel que proposé par Zargayouna [61]) et permet de faire des mises à jour locales de la solution en cours.

Tableau 2- Tableau comparatif des différentes approches

Travail	Aspect dynamique	Réactivité vs Pro activité (*)	Informations en temps réels	Efficacité de calcul (**)
Yang [65]	Demande & temps de parcours	Haute	Mou («soft real time»)	Haute
Ibri et al. [41] [40]	Demande	Moyenne	Données purement statiques	Haute
Pillac et al. [67]	Demande	Haute	Mou («soft real time»)	Haute
Zhao et al. [68]	Demande & temps de parcours	Haute	Mou («soft real time»)	Faible
Greenwood et al. [51]	Demande & temps de parcours	Haute	Strict («hard real time»)	Haute
Lou et al. [70]	Demande	Haute	Données purement statiques	Faible
Lopez et al. [54]	Demande & temps de parcours	Moyenne	Strict («hard real time»)	Moyenne

(*) On considère que la solution est de haute réactivité si elle réagit à temps aux événements (changement sur la route ou arrivée d'une nouvelle demande); par contre, si le traitement se fait par intervalle, il s'agit d'une réactivité moyenne; enfin, la réactivité est faible si aucun traitement de déviation ou de ré-routage n'est permis.

(**) L'efficacité de calcul correspond au temps de calcul nécessaire.

Le troisième facteur clé est l'algorithme du plus court chemin utilisé lors des calculs. L'approche de Jigang et al. [77] fournit une approximation rapide et intéressante dans notre contexte puisqu'il faut des réponses assez rapides dans un contexte dynamique. On retiendra donc cette idée qu'on cherchera à adapter à nos besoins au chapitre suivant.

Chapitre 3 : Méthodologie

Notre système adaptatif de gestion de véhicules d'urgence réagit aux changements dans l'environnement. Il décide, d'une part, des traitements adéquats pour faire face à ces variations et d'autre part de la façon dont l'architecture du système devrait être reconfigurée afin d'optimiser la performance globale du système, en particulier la rapidité de traitement. On se restreindra dans ce travail à l'optimisation de la répartition des véhicules d'urgence. Nous commençons par décrire les traitements adéquats et les solutions envisagées qui permettent d'atteindre les objectifs que nous avons fixés pour notre projet. Ensuite, nous présentons en détail l'approche de résolution choisie.

1. Construction de la solution

L'objectif principal du système adaptatif de gestion de véhicules d'urgence consiste à minimiser les temps de réponse des véhicules d'urgence. Pour développer notre solution, nous procédons par la recherche de solutions pour atteindre les objectifs secondaires que nous avons définis. La réponse à ces objectifs, en se basant sur l'analyse faite dans le chapitre précédent, nous permettra de rassembler les éléments de notre solution ainsi de construire la solution globale pas à pas.

1.1. Modélisation du système de gestion des véhicules d'urgence

L'objectif est de modéliser le système de répartition des véhicules d'urgence en considérant les nouvelles technologies de communications déployées et assurant des interactions entre les véhicules d'urgence et ce système.

Suite à notre analyse faite au chapitre état de l'art, une architecture hybride comme celle définie dans [42] et [59], établit un lien de communication et un partage des décisions entre la station centrale de répartition de véhicules et les véhicules qui entraîne un minimum d'inconvénients si on la compare aux autres architectures. De plus, elle est souhaitable dans notre contexte étant donné la nature distribuée du problème.

La technologie émergente de véhicules connectés (Figure 3-1) forme des réseaux dits réseaux ad hoc véhiculaires (VANet « Vehicular Ad-Hoc Networks »), qui se caractérisent par des communications entre les véhicules (V&V) ou entre les véhicules et l'infrastructure (V&I).

Ces derniers permettent des transmissions d'informations entre les véhicules et le centre de répartition des véhicules et de maintenir une communication perpétuelle. Il est ainsi plus facile pour les véhicules d'urgence d'échanger des informations et de faire des mises à jour sur leurs environnements en continu.

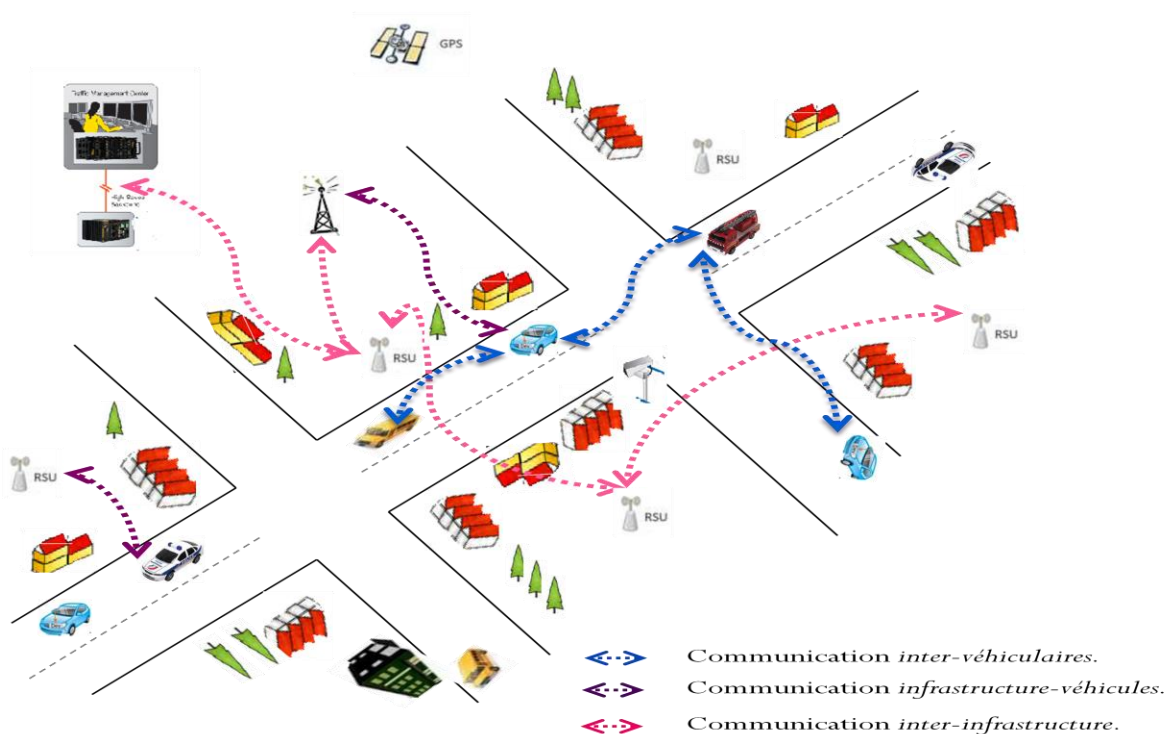


Figure 3-1 Concept de véhicules connectés VANet

Nous considérerons ainsi que les éléments de notre système (flotte de véhicules d'urgence et centre de répartition de véhicules d'urgence, etc.) sont inter-reliés par un réseau VANet et interagissent dans le cadre d'une architecture hybride de gestion (partage, échange et inter-coopération entre les différents éléments du système).

1.2. Identification des principaux événements

Nous étudions dans cette section les événements significatifs qui peuvent survenir tout en affectant la performance des véhicules sélectionnés pour répondre aux urgences. Des traitements adéquats sont alors requis pour répondre aux nouvelles situations.

Nous identifions trois catégories principales d'événements, à savoir l'arrivée de nouvelles demandes de service, l'occurrence de congestion et l'occurrence de pannes.

L'arrivée de nouvelles demandes de service a déjà fait objet à nos discussions au niveau de notre analyse dans le chapitre état de l'art (ex. [36], [41], [65]). Ici, le traitement nécessaire diffère selon l'urgence de la nouvelle demande. Par exemple, dans le cas d'une demande très urgente, une haute priorité de traitement est essentielle vu le temps de réponse réduit qu'elle réclame. Il est donc nécessaire d'affecter le véhicule libre le plus proche ou, s'il n'y en a pas, de réaffecter un des véhicules en route vers une demande moins urgente se trouvant dans le voisinage de la nouvelle demande.

L'occurrence de congestion peut survenir pour diverses raisons, tel un accident sur la route, une route bloquée par un obstacle imprévu, un feu de signalisation en panne, etc. Cette situation est très rarement abordée dans l'état de l'art concernant les études du problème de répartition dynamique des véhicules d'urgence. Là aussi, le traitement qui doit être associé à cette situation dépend de la position du véhicule d'urgence par rapport au lieu de la congestion, étant donné que la propagation de la congestion n'est pas instantanée. Par exemple, dans le cas où la congestion a déjà atteint un véhicule en route vers un appel de secours, de sorte qu'il se trouve coincé, un véhicule de remplacement doit être appelé en renfort. Par contre, une route alternative peut être envisagée si le véhicule n'est pas encore immobilisé.

L'occurrence de pannes de véhicules correspond au dernier type d'événements. Malgré les faibles probabilités liées à cet événement, il demeure qu'un tel événement doit être considéré.

1.3. Définition d'approche de reconfiguration réduisant l'impact des variations

L'objectif ici est de définir l'approche de reconfiguration afin de répondre rapidement aux différentes variations de l'environnement et maintenir les temps de réponse au minimum.

Étant donné la complexité du système due à la variation des exigences selon le type d'événements et la multiplicité des facteurs qui entrent en jeu, il est difficile de recourir à une seule approche algorithmique. En conséquence, nous proposons une approche contextuelle à base de scénarios. Cette approche reposera sur une base de règles définies à partir des principaux événements (tels que présentés plus haut) pour lesquels nous identifions les traitements adéquats. Ainsi, dépendamment de l'événement envisagé, un algorithme spécifique sera appliqué.

Étant donné que les traitements spécifiques adaptés à chaque scénario font également appel à des composants communs de l'architecture, l'idée d'une architecture reconfigurable telle

que définie par Benyahia et Potvin [33] paraît appropriée. Une librairie de composants prédéfinis pourrait ainsi être mise en place, dont certains seraient appelés dépendamment du contexte.

Évidemment, il faudra d'abord instancier cette architecture pour notre application et définir les relations et dépendances entre les éléments de base du système, afin de représenter en particulier les communications inter-véhiculaires. Nous en discuterons plus en détail dans la section qui suit.

1.4. Maximisation de l'utilisation de la flotte de véhicules

L'objectif est de maximiser l'utilisation de la flotte de véhicules d'urgence, en se basant sur la technologie des communications sans fil inter-véhiculaires, compte tenu du nombre restreint de véhicules disponibles et des contraintes temporelles.

Si on considère qu'un réseau VANet est établi entre les véhicules de la flotte, ceux-ci pourront communiquer en continu leur position, leur vitesse et leur état (libre, en route vers un appel de secours, etc.). Ainsi, le centre de répartition des véhicules d'urgence pourra avoir une vision plus globale et complète de tous les éléments de la prise de décision. Subséquemment, il pourra être capable d'identifier le(s) véhicule(s) le(s) plus approprié(s) à chaque contexte et maximiser l'utilisation de la flotte de véhicules.

De plus, l'idée d'une zone d'action de véhicule, telle que présentée dans [61], pourra aider à identifier rapidement les véhicules candidats pour répondre à une demande. Dans notre cas, la zone d'action de chaque véhicule peut être définie comme la région que peut atteindre un véhicule à l'intérieur d'un intervalle de t minutes. Elle pourrait être déduite rapidement des informations de localisation et de vitesses échangées en continu, créant ainsi une zone d'action redéfinie dynamiquement pour chaque véhicule.

La notion de la zone d'action dynamique nous permettra aussi de concentrer les mises à jour à la configuration de la flotte aux éléments vraiment concernés par les changements. Seules les routes des véhicules impactés par l'évènement sont réévaluées. Ainsi, nous pourrions épargner le temps de la vérification des parcours de tous les véhicules de la flotte et effectuer des optimisations ponctuelles.

Avec cette zone d'action et les statuts échangés continuellement entre les véhicules, la déviation de la trajectoire d'un véhicule ou le ré-routage d'un véhicule s'en trouvent facilités, ceci sans parler de la possibilité d'échange d'informations sur la congestion entre les véhicules.

Pour conclure, notre solution sera basée sur une architecture hybride de gestion (partage, échange et inter-coopération entre les différents éléments du système) où les éléments de notre système seront interconnectés via un réseau VANet. Pour répondre aux incertitudes de notre environnement, nous proposons une approche contextuelle à base de scénarios. Une architecture reconfigurable telle que définie dans [33] sera mise en place offrant des traitements personnalisés et adaptés à chaque événement tout en utilisant des composants communs de l'architecture. Nous avons essayé d'identifier les principales catégories d'événements qu'un véhicule d'urgence pourra envisager en route auxquels nous aurons à spécifier les adaptations nécessaires. Finalement pour réduire la complexité de traitements et limiter les modifications nécessaires nous appliquerons l'idée de zone d'action dynamique pour chaque véhicule.

2. Approche de résolution

Nous présentons dans cette section les détails de l'approche de résolution choisie. Nous commençons par détailler l'architecture de résolution qui englobe les différents éléments de la solution.

2.1. Architecture de résolution

Comme discuté plus haut, l'architecture choisie s'inspire du cadre défini par Benyahia et Potvin [33], avec une légère modification pour satisfaire aux exigences spécifiques de notre application. Dans ce qui suit, nous introduisons le cadre de gestion proposé dans [33], suivi de son instanciation pour la résolution du problème de répartition de véhicules d'urgence en temps réel.

2.1.1. Le cadre de gestion

Le cadre de gestion défini dans Benyahia et Potvin [33] est caractérisé par une architecture distribuée composée de trois catégories de composants appelés agents (Figure 3-2).

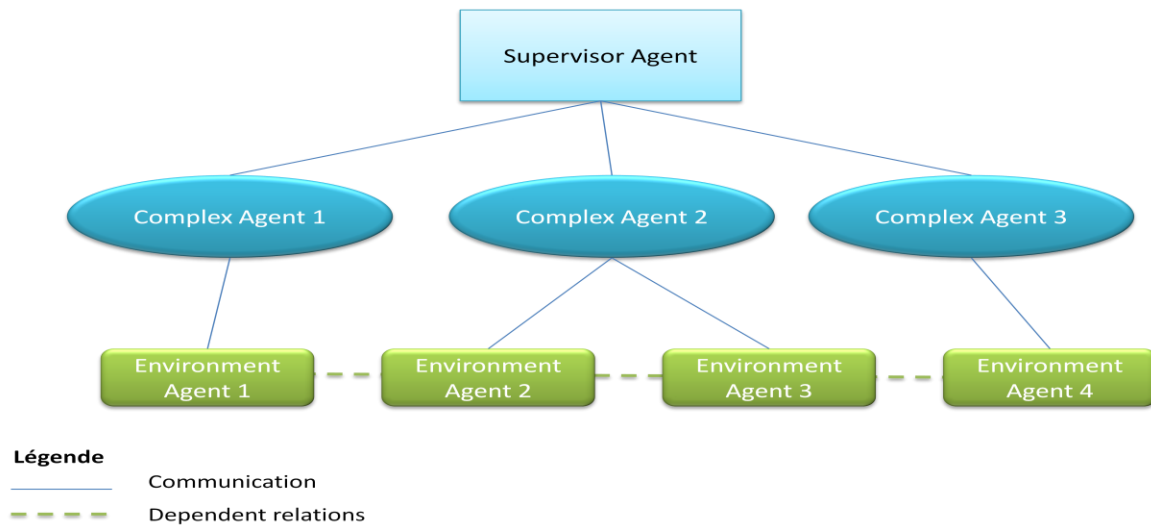


Figure 3-2 Architecture d'application complexe (Benyahia et Potvin [33])

Les agents environnement simulent le comportement des composants de l'environnement et représentent les entités gérées. Lorsque des changements importants se produisent, ces entités gérées interagissent avec les agents gestionnaires (également appelés agents complexes « AC ») qui sont spécialisés dans le traitement des événements et le contrôle des entités gérées. Un agent complexe est défini par son rôle, sa base de connaissances et sa méthode de communication avec d'autres agents. Toutefois, les agents complexes ne peuvent pas communiquer directement entre eux, afin d'éviter une dégradation des performances.

L'agent superviseur est un composant du système responsable de la délégation de l'événement. Les agents complexes interagissent par exemple avec l'agent superviseur quand leur charge de traitement atteint un seuil prédéfini. L'agent superviseur dispose d'une visibilité complète sur tous les agents gestionnaires.

2.1.2. *Instanciation de l'architecture à notre contexte*

L'architecture pour notre application comprenant trois couches logicielles est présentée à la Figure 3-3. La couche inférieure est constituée de deux catégories d'agents. Tout d'abord les agents environnement embarqués tels les véhicules d'urgence, munis d'une capacité de traitement, puis les agents environnement matériels tels que les senseurs (ex. boucles de détections, caméras vidéo, etc.).

Les agents environnement véhicules sont en perpétuelle communication bidirectionnelle avec les agents complexes par l'entremise d'une couche de télécommunication VANet et relaient

continuellement leur statut (position, vitesse, direction, état, etc.). Les agents environnement senseurs, quant à eux, relaient en temps réel les données décrivant l'état du réseau.

La couche intermédiaire est constituée de multiples agents complexes (ACs) dont le rôle est de traiter les informations reçues de l'agent superviseur et celles générées localement par les senseurs dispersés au sein de l'infrastructure physique du réseau routier. Ils doivent aussi coordonner avec la flotte de véhicules pour prendre des décisions de gestion et de contrôle.

Plusieurs types d'AC spécialisés sont définis pour traiter les informations nécessaires aux décisions de répartition. Ceux-ci peuvent d'ailleurs travailler en concurrence. On considère par exemple un agent complexe détecteur de congestion (AC_Detecteur_Congestion) qui détecte les variations importantes sur le réseau routier (ex. apparition de la congestion, accident, etc.), les évalue (ex. une congestion importante est associée à un risque important) et transmet l'information à l'agent superviseur qui se chargera par la suite de la transmettre aux agents complexes concernés. Un autre agent complexe affectation (AC_affectation) prend en charge l'exécution des décisions d'affectation ainsi que la minimisation des réaffectations. Un agent complexe voisinage (AC_voisinage) calcule les zones d'action dynamiques des véhicules et sélectionne les véhicules candidats, etc. D'autres ACs sont spécialisés dans la répartition des véhicules : on les désigne par AC_Station et on leur associe un ensemble de véhicules et une zone géographique. Une sélection définie de ces ACs est utilisée à chaque contexte.

La couche supérieure est représentée par un agent spécial, soit l'agent superviseur de zone. Ce dernier a diverses responsabilités : affecter et équilibrer la charge de traitement des données entre les agents des couches inférieures, recevoir les événements tels que les appels d'urgence et les notifications de congestion, transmettre les requêtes vers les AC_Station les plus proches de la zone d'appel et alerter les AC_Station en cas de congestion sur les routes. La Figure 3-3 illustre les interactions entre les trois couches.

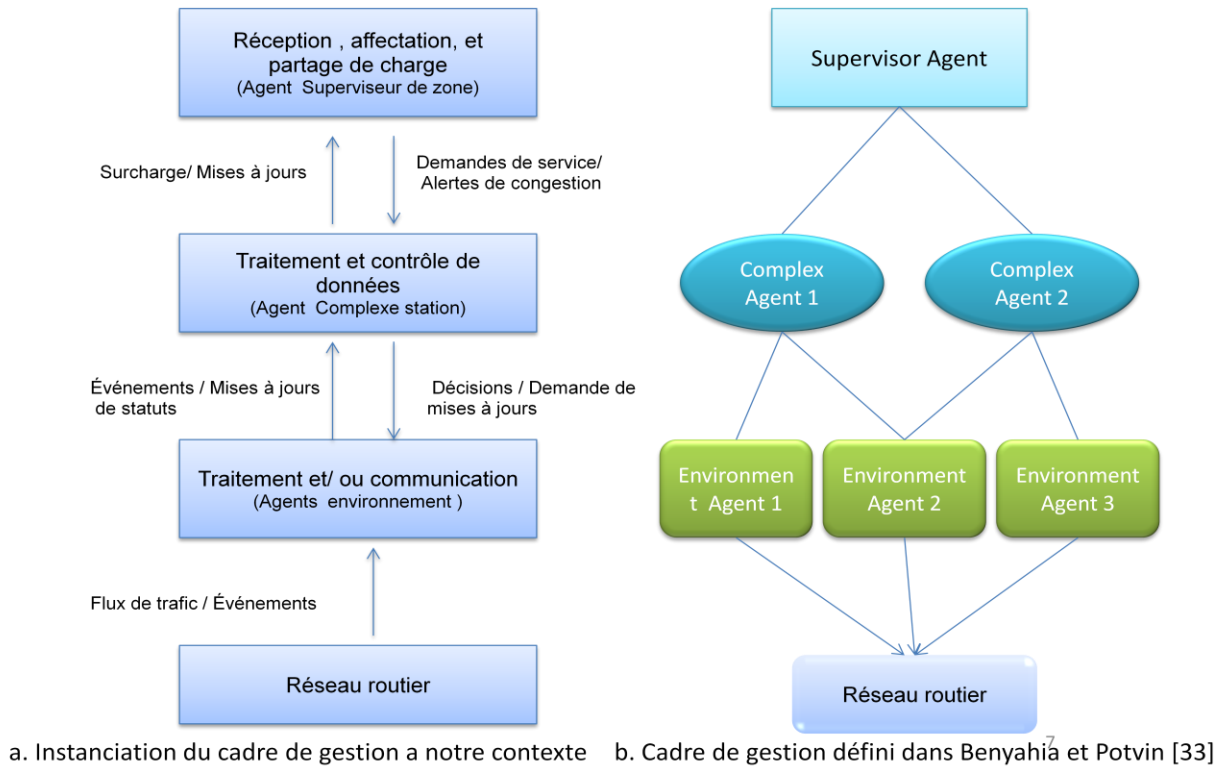


Figure 3-3 Les interactions entre les trois couches

2.2. Méthodologie décisionnelle

Le système de gestion de véhicules d'urgence est sujet à des exigences variables vu la multitude d'événements (appel, panne, congestion, etc.), les différents niveaux d'urgence rencontrés et la variation des exigences selon le type d'événements. Il est ainsi amené à s'adapter continuellement à ces variations dans l'environnement pour maintenir une bonne qualité de service. De ce fait, il est difficile de formaliser ce problème dans un environnement incertain à l'aide de modèles mathématiques ou de règles de décision explicites. Une seule approche algorithmique à base d'heuristiques ne pourrait pas satisfaire les différentes contraintes d'exécution d'une telle application temps réel vu la grande variation des facteurs qui entrent en jeu. Conséquemment, notre méthodologie décisionnelle adopte une approche contextuelle à base de scénarios.

Une base de règles est définie à partir des principaux événements qui peuvent être rencontrés, pour lesquels on spécifie un algorithme de traitement et une configuration adéquate. Il s'agit en quelque sorte d'un système de gestion adaptatif. Pour ce faire, notre système regroupe trois sous-systèmes, soit Environnement, Traitement et Décision. Ceux-ci collaborent afin de

produire une décision optimisée. Les trois sous-systèmes présentés dans la Figure 3-4 sont brièvement décrits dans ce qui suit.

2.2.1. Sous-système Environnement

L'environnement routier est modélisé par un module (« Environnement») qui transmet en continu des événements (appels de service) et des mises à jour du flux de trafic qui seront traités par le système de gestion de véhicules d'urgence. Le comportement de cet environnement est aléatoire et des perturbations inattendues peuvent parfois affecter son flux.

La flotte de véhicules d'urgence est modélisée par un module (« Flotte de véhicules») qui transmet en continu des mises à jour d'états au système de gestion des véhicules d'urgence.

Ces deux modules reproduisent le comportement des agents environnement, tels les véhicules d'urgence et les senseurs, de notre cadre de gestion (Figure 3-3).

Le sous-système Environnement collabore, d'une part, avec le sous-système Traitement auquel il fournit les mises à jour des temps de parcours (à considérer lors des traitements) et, d'autre part, avec le sous-système Décision auquel il fournit les événements et les mises à jour du flux de trafic qui seront analysés pour détecter les changements dans l'environnement et amorcer les ré optimisations appropriées.

L'arrivée dynamique des appels de service est reproduite en utilisant un flux synthétique d'événements selon des lois de distributions assimilables aux comportements des systèmes d'urgence (ex. [14], [80]). D'après l'étude de Haghani et Yang [14] réalisée sur des données réelles, le temps d'inter-arrivée pour les appels d'urgence, qui est le temps entre deux appels d'urgence successifs, suit une distribution exponentielle avec une moyenne de 15-30 minutes. Le temps de service pour les appels d'urgence suit quant à lui une distribution normale.

Pour refléter les congestions inattendues, une perturbation dynamique est généralement ajoutée aux prévisions de temps de déplacement (ex. [65], [80]). Dans [80] par exemple, la valeur de cette dernière est générée selon une loi de probabilité normale de moyenne zéro avec différents écarts-types. Comme on ne considère que les retards (augmentation de temps de parcours), la perturbation négative est fixée à 0.

Les comportements imprévus de l'environnement seront amorcés aléatoirement via des scénarios de congestion permettant d'étudier l'efficacité de notre système de gestion pour la détection et le déclenchement de plans d'adaptation adéquats.

2.2.2. Sous-système Décision

Le sous-système Décision est composé de deux modules, à savoir le module « Détection de congestion » et le module «Gestionnaire».

Le module « Détection de congestion » modélise le comportement de l'agent complexe AC_Detecteur_Congestion de notre cadre de gestion (Figure 3-3). Il est chargé de la surveillance du flux de trafic et de l'estimation des variations dans l'environnement. Il observe continuellement les mises à jour du flux de trafic afin d'analyser les fluctuations et détecter les perturbations imprévues. Les méthodes utilisées dans ce module ne font pas l'objet de notre travail. Pour ceci, on utilisera plutôt un des algorithmes de détection de congestion rapportés dans la littérature.

Le module «Gestionnaire» modélise le comportement de l'agent superviseur et de l'agent complexe AC_Station de notre cadre de gestion (Figure 3-3). Il encapsule la fonctionnalité associée à la prise de décisions. L'agent superviseur décide de l'agent complexe AC_Station approprié à l'événement en se basant sur la couverture et de l'état de saturation de chacun d'eux. Par la suite l'agent complexe AC_Station choisi spécifie le traitement utile aux événements qu'il reçoit du sous-système Environnement (Evénement (Figure 3-4)) ou du module «Détection de congestion» (Signal « Congestion » (Figure 3-4)). Pour ceci, il utilise une base de règles ainsi que les mises à jour des statuts du module « Flotte de véhicules » pour décider du scénario en question. Les détails du fonctionnement de ce module seront explicités dans la section qui suit.

Le sous-système Décision collabore aussi avec le sous-système Traitement auquel il soumet des solutions de reconfiguration (Signal «Décision» (Figure 3-4)) à des fins d'exécution.

2.2.3. Sous-système Traitement

Le sous-système Traitement encapsule la composition et l'exécution de l'architecture dynamique discutée plus haut. Les traitements sur les événements reçus de l'environnement externe sont effectués dépendamment des décisions fournies par le sous-système Décision. Ce dernier transmet les notifications de changements de configuration de l'architecture de traitement

distribué après une analyse des événements reçus (Signal «Décision»). Le sous-système Traitement invoque par la suite les composants spécialisés, une sélection d'agents complexes de notre cadre de gestion (Figure 3-3), nécessaires à la nouvelle configuration et appelle les méthodes appropriées pour la mettre en place. Ces agents complexes sont archivés dans une librairie («Librairie de composants» (Figure3-4))

Ce sous-système inclut aussi un module de prévision des temps de parcours (module «Prévision du temps de parcours») et un module de calcul du plus court chemin (module «Plus court chemin»). Ceux-ci sont évoqués à des intervalles fixes pour mettre à jour les temps de parcours. Des mises à jour ponctuelles peuvent aussi être demandées par le sous-système Décision lors de la détection d'événements (accident, congestion, etc.). Celles-ci sont habituellement locales, c'est-à-dire de l'emplacement actuel de certains véhicules vers leur destination (sites d'urgence, hôpitaux, stations).

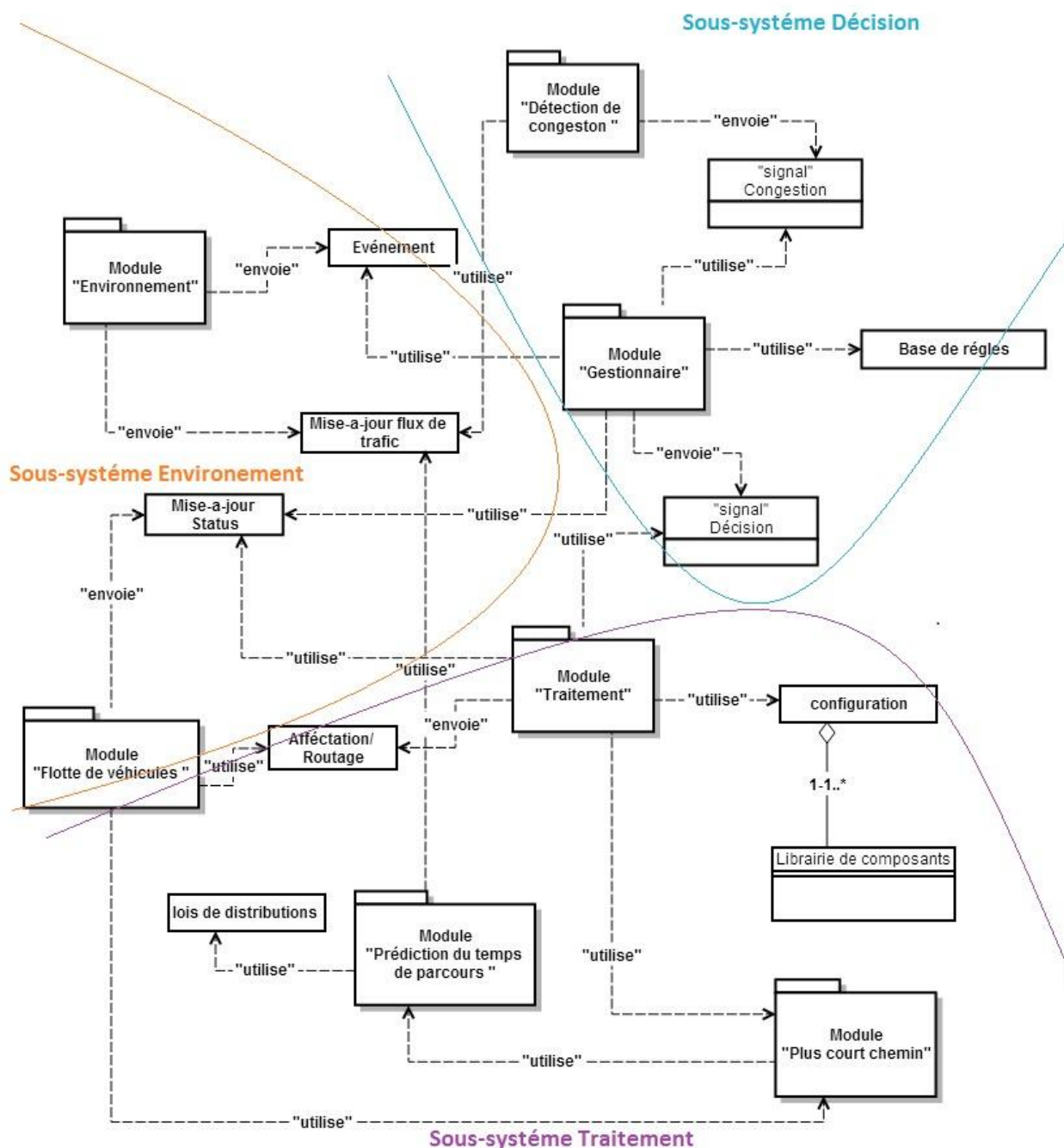


Figure 3-4 Diagramme de collaboration du système de gestion des véhicules

2.3. Modélisation de la structure décisionnelle

L'adaptation dynamique du système adaptatif de gestion de véhicules d'urgence opère selon un algorithme général qui comporte les étapes suivantes: surveillance du système, détection d'une condition d'adaptation, notification du module décisionnel, identification du

contexte (ou scénario), sélection d'une alternative de reconfiguration pour le traitement (à partir de la base de règles), mise en œuvre de l'alternative et retour éventuel à la normale [22].

La notion d'alternative fait ici référence à la combinaison des composants de traitement (AC) que le système peut appliquer en fonction du contexte. Elle définit en quelque sorte la structure des composants de traitement et les interconnexions entre ces composants afin de produire une architecture particulière adaptée à un contexte spécifique.

La base de règles identifie les paramètres dynamiques associés aux événements et indique quelle alternative de configuration devrait être adoptée pour répondre à ces événements moyennant un certain nombre de scénarios prédéfinis. On procédera dans la suite à l'identification des paramètres et des scénarios probables ainsi que les configurations et les séquences de traitements nécessaires.

2.3.1. Scénarios de traitements envisagés

Trois grandes catégories d'événements ont déjà été identifiées à savoir l'arrivée d'un nouvel appel de secours, l'occurrence de congestions sur la route et l'occurrence d'une panne. Des cas particuliers peuvent découler de ces trois catégories, dépendamment des paramètres de l'environnement.

Dans cette section, nous tenterons d'identifier les paramètres associés aux événements, d'indiquer la configuration requise à savoir la séquence des traitements nécessaires et les composants de traitement (agents complexes), de la librairie de composants du sous-système Traitement (Figure 3-4 : Sous-système Traitement), qui devraient être exécutés pour répondre à ces événements. Dans ce but, nous considérerons chacune des catégories d'événements une à une, avec un accent particulier sur les aspects qui n'ont pas déjà été traités dans la littérature.

Une fois définies, ces associations entre paramètres et configurations formeront les éléments de la base de règles que le module « Gestionnaire » consultera à chaque fois qu'il reçoit un événement pour décider des traitements adéquats requis (Figure 3-4 : sous-système Décision).

2.3.1.1. L'occurrence de congestion sur la route

La notification de congestion sur la route peut être déclenchée par le module de détection de congestion ou même par un véhicule sur la route. Dans le premier cas, les mises à jour du flux de trafic reçues indiquent une déviation par rapport à un seuil donné. Un événement de

congestion est alors produit par le module «Détection de congestion» et transmis au module «Gestionnaire» (sous-système Décision) pour indiquer le lieu de la congestion et son importance. Dans un tel cas, les emplacements des véhicules par rapport au lieu de la congestion doivent être considérés et des plans de déviation peuvent être amorcés au besoin. Dans le second cas, la notification est reçue du véhicule lui-même. Un plan de remplacement peut alors s'avérer nécessaire dépendamment du degré de congestion rapportée et de l'emplacement du véhicule.

Nous discutons ci-dessous des traitements nécessaires pour quelques exemples de scénarios. Un cas de forte congestion est rapporté dans un premier scénario par le module de détection de congestion (Figure 3-5) et dans un second scénario par un véhicule coincé sur la route (Figure 3-6). Ce dernier est semblable au scénario où une route est obstruée par un obstacle (Figure 1-3) tel que discuté précédemment.

Scénario 1 : Forte congestion sur la route :

Entrée :

- Notification de congestion reçue du module de détection de congestion (Sous-système Décision) avec son emplacement.

Traitement Requis:

La Figure 3-5 récapitule les traitements requis et les composants (ACs de la librairie de composants du sous-système Traitement) engagés pour l'exécuter. Les détails sont explicités tout de suite après.

Les agents complexes sélectionnés lors de ce traitement sont AC_Dispatcheur, AC_Distance, AC_Comparaison de Route, AC_Diversion.

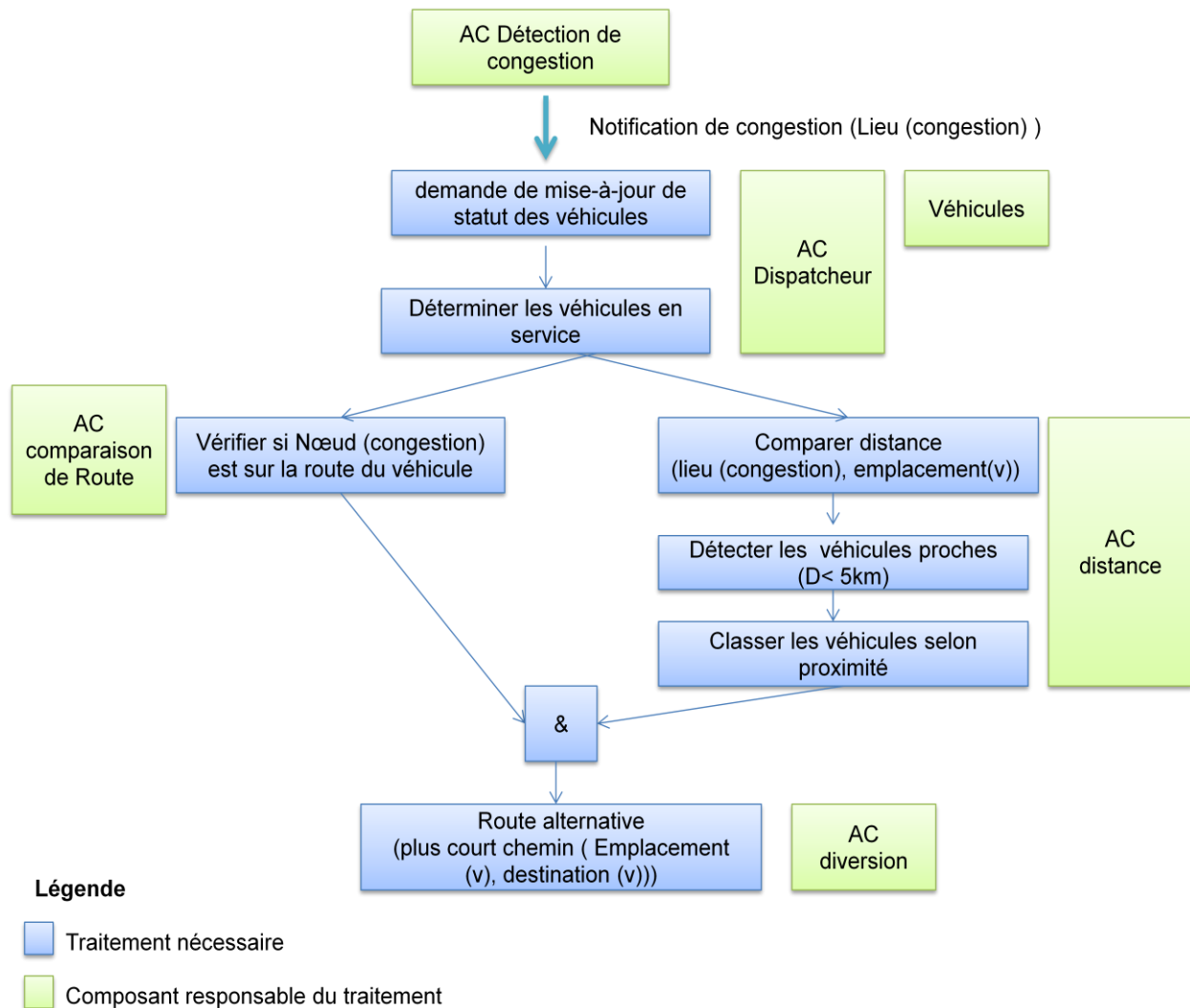


Figure 3-5 Scenario d'exécution pour notification forte congestion sur la route

Détails des traitements :

1- Envoie une demande de mise-à-jour de statut à tous les véhicules de la flotte (AC_Dispatcheur).

Hypothèse : On suppose que l'envoi et la réception des messages de mise-à-jour sont quasi-instantanés.

2- Déterminer les véhicules en service (i.e. ceux qui sont en route vers un site d'urgence ou un hôpital) (AC_Dispatcheur).

Hypothèse : On suppose que la congestion n'a pas d'impact significatif sur les véhicules libres, en traitement sur site, ou hors service.

3- Pour chaque véhicule en service sélectionné

a) Vérifier les emplacements du véhicule par rapport au lieu de la congestion (AC_Distance).

- Distance (entre le lieu de la congestion et l'emplacement du véhicule).
- Détecter les véhicules proches du lieu de la congestion (ex. distance < 5 km).
- Classer les véhicules selon leur proximité du lieu de la congestion.

b) Vérifier en parallèle (traitement concurrent) si le lieu de la congestion se trouve sur le chemin du véhicule en service (AC_Comparaison de Route).

- Comparer les nœuds sur le chemin actuel au nœud de congestion.

4- Déterminer les nouveaux itinéraires pour les véhicules affectés par la congestion (i.e., ceux proches et passeront par le point de la congestion) (AC_Diversion).

- Calcul du nouveau chemin (plus court chemin dynamique entre l'emplacement actuel du véhicule et sa destination).
- Notification(s) de mise-à-jour de parcours.

Scénario 2 : Forte congestion sur la route et notification de véhicule immobilisé:

Entrée :

- Notification du véhicule (en route vers un site d'urgence) immobilisé.
- Notification de la congestion et de son emplacement.

Traitement Requis:

La Figure 3-6 récapitule les traitements requis et les composants (ACs de la librairie de composants du sous-système Traitement) engagés pour l'exécuter. Les détails sont explicités tout de suite après.

Les agents complexes sélectionnés lors de ce traitement sont AC_Dispatcheur, AC_Distance, AC_Comparaison de Route, AC_Diversion, AC_Voisinage, AC_D'affectation.

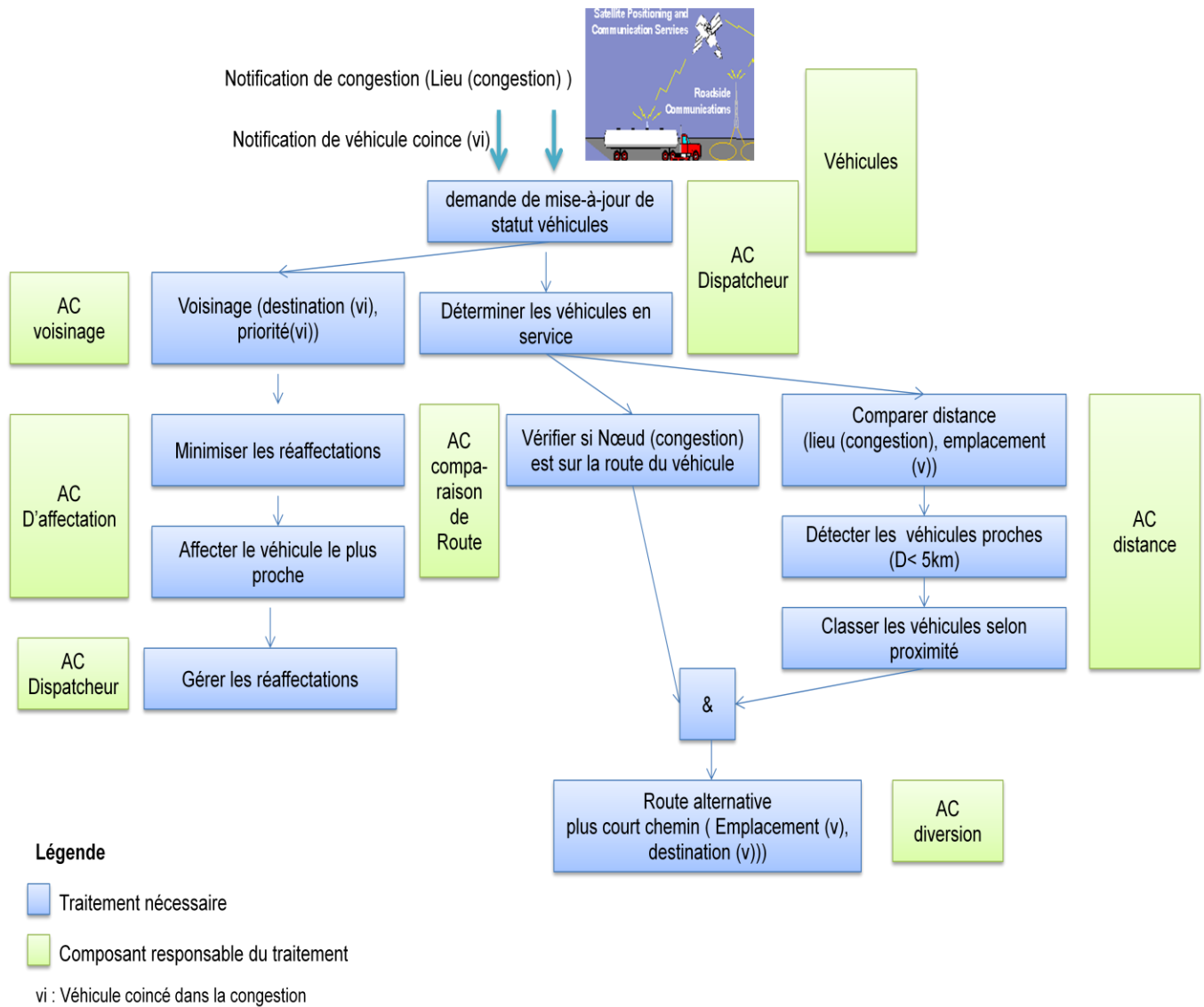


Figure 3-6 Scénario d'exécution pour notification de véhicule coincé par une congestion

Détails des traitements:

- 1- Envoi d'une demande de mise-à-jour de statut à tous les véhicules de la flotte (AC_Dispatcheur).
- 2- Déterminer les véhicules en service (i.e., ceux qui sont en route vers un site d'urgence ou un hôpital) (AC_Dispatcheur).

Hypothèse : On suppose que la congestion n'a pas d'impact significatif sur les véhicules libres, en traitement sur site, ou hors service.

3- Détecter les véhicules ayant un voisinage couvrant le site d'urgence affecté au véhicule immobilisé (vi) (AC_Voisinage).

- Voisinage (emplacement de l'appel d'urgence, priorité de l'appel d'urgence)

4- Minimiser les réaffectations (AC_D'affectation).

- Si le véhicule candidat choisi est déjà en route vers un autre site d'urgence. Comparer le temps de parcours du véhicule en service choisi à celui des autres véhicules libres candidats.

Si la différence entre le temps de parcours $< \tau$ alors privilégier les véhicules libres.

Hypothèse : Lorsque plusieurs candidats existent, un véhicule en route vers un site d'urgence ne sera réaffecté que si le bénéfice en temps de réponse (temps de parcours) est supérieur à une valeur τ . La valeur de τ sera définie dans le chapitre suivant (simulation).

5- Affecter le véhicule le plus proche (AC_D'affectation).

- Mettre à jour le statut du véhicule sélectionné.
- Notification(s) de mise-à-jour de parcours.

6- Gérer les réaffectations (AC_Dispatcheur).

- Si une réaffectation a été effectuée alors
 - Augmenter le niveau de criticité de l'appel réaffecté.
 - Remettre l'appel réaffecté dans la liste des demandes de service.

7- Exécuter en parallèle le même traitement pour le calcul des nouveaux itinéraires que celui appliqué au scénario 1.

- Dévier les véhicules en service qui sont proches du point de la congestion et qui devront passer par ce point.

2.3.1.2. Panne d'un véhicule d'urgence en route

La notification de panne est déclenchée par les véhicules eux-mêmes. Le traitement requis pour un véhicule en panne sur la route ne diffère pas tellement de celui requis par un

véhicule immobilisé dans une congestion. La seule différence est que la notification de panne engage un traitement local pour le véhicule qui est en panne sans qu'il y ait nécessité de revoir les routes des autres véhicules (Figure 3-7).

Scénario 3 : Panne de véhicule en route

Entrée :

- Notification de véhicules en panne en route vers un hôpital ou un site d'un appel d'urgence.

Traitement Requis:

La Figure 3-7 récapitule les traitements requis et les composants (ACs de la librairie de composants du sous-système Traitement) engagés pour l'exécuter.

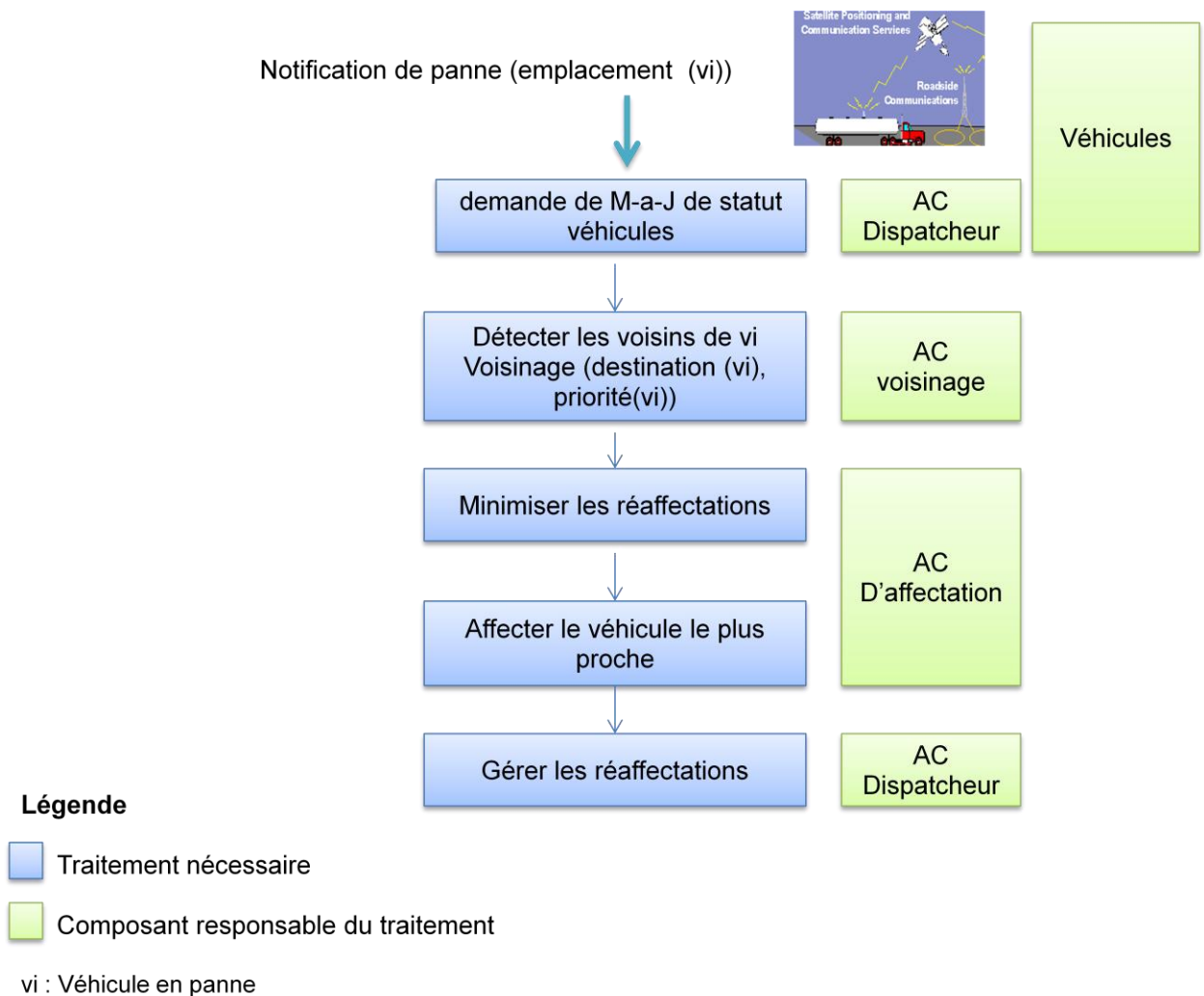


Figure 3-7 Scénario d'exécution de notification d'un véhicule en panne

Les agents complexes sélectionnés lors de ce traitement sont AC_Dispatcheur, AC_Voisinage, AC_D'affectation.

Détails des traitements :

1- Envoi d'une demande de mise-à-jour de statut à tous les véhicules de la flotte (AC_Dispatcheur).

2- Détecter les véhicules à proximité du véhicule en panne (vi) (AC_Voisinage).

Hypothèse : seuls les véhicules libres ou en route vers un site d'urgence sont considérés.

3- Minimiser les réaffectations (AC_D'affectation).

- Si le véhicule candidat choisi est déjà en route vers un autre site d'urgence. Comparer le temps de parcours du véhicule en service choisi à celui des autres véhicules libres candidats.

Si la différence entre le temps de parcours $< \tau$ alors privilégier les véhicules libres

Hypothèse : Lorsque plusieurs candidats existent, un véhicule en route vers un site d'urgence ne sera réaffecté que si le bénéfice en temps de réponse (temps de parcours) est supérieur à une valeur τ . La valeur de τ sera définie dans le chapitre suivant (simulation).

4- Affecter le véhicule le plus proche (AC_D'affectation).

- Mettre à jour le statut du véhicule sélectionné
- Notification(s) de mise-à-jour de parcours

5- Gérer les réaffectations (AC_Dispatcheur).

- Si une réaffectation a été effectuée alors
 - Augmenter le niveau de criticité de l'appel réaffecté.
 - Remettre l'appel réaffecté dans la liste des demandes de service.

2.3.1.3. Arrivée d'un nouvel appel d'urgence

Cet événement est abondamment discuté dans la littérature. Les traitements requis dépendent en grande partie de l'urgence de l'appel reçu. On considère dans cette étude trois niveaux de priorité : haut, moyen et minimal.

Dans le cas où la priorité de l'appel reçu est minimale ou moyenne, seuls les véhicules libres sont considérés pour une affectation. Par contre, lorsque la priorité de l'appel est élevée, même les véhicules en route vers un autre site d'urgence sont pris en considération.

Nous discuterons ci-dessous des traitements nécessaires en cas d'un appel de haute priorité.

Scénario 4 : Nouvel appel d'urgence de haute priorité

Entrée :

- Événement : appel d'urgence de haute priorité.

Traitement Requis:

- 1- Envoi de demande de mise-à-jour de statut à tous les véhicules de la flotte (AC_Dispatcheur).
- 2- Déterminer les véhicules candidats (i.e. ceux qui sont en route vers un site d'urgence ou libres) (AC_Dispatcheur).
- 3- Sélectionner le premier appel d'urgence dans la liste, jusqu'à ce que tous les véhicules soient affectés ou que tous les appels d'urgence soient servis. (AC_Dispatcheur).
 - Trier les appels d'urgence de haute priorité s'ils existent selon leur temps d'attente dans le système.
- 4-Détecter les véhicules à proximité de l'appel d'urgence (AC_Voisinage).
- 5- Minimiser les réaffectations (AC_D'affectation).
- 6- Affecter le véhicule le plus proche (AC_D'affectation).
- 7- Gérer les réaffectations (AC_Dispatcheur).

2.3.2. Algorithmes de résolution

Pour fixer un peu les idées, nous présentons dans cette section le fonctionnement de certains algorithmes utilisés lors des traitements mentionnés ci-dessus. Ces algorithmes sont encapsulés dans les ACs spécialisés.

2.3.2.1. Mise-à-jour de statut d'un véhicule d'urgence

Comme mentionné plus haut, nous supposons que les véhicules de la flotte communiquent entre eux et avec la station centrale via un réseau VANet et transmettent continuellement leur statut. Les informations pour la mise-à-jour comprennent: l'emplacement actuel, le chemin à emprunter, la destination, l'état actuel et la priorité servie si elle existe. Les différents états possibles d'un véhicule sont :

- Libre
- En route vers un site d'urgence
- Chargé et en route vers un hôpital (occupé)
- En traitement sur site (occupé)
- En recharge (hors service)

Certains changements d'état du véhicule peuvent entraîner une ré-optimisation. Par exemple, si un véhicule a terminé le traitement sur site et affiche l'état "Libre", cela signifie que le véhicule est maintenant disponible et peut être affecté à un autre appel d'urgence.

Les statuts avec état "Libre" et "En route" vers un site d'urgence sont les plus consultés lors des ré optimisations puisque seuls ces véhicules peuvent être affectés ou déviés de leur route pour servir les appels ou éviter une congestion.

Les statuts avec état "Chargé et en route vers un hôpital" et "En route" vers un site d'urgence nécessitent une supervision continue de route afin d'éviter toute congestion ou imprévu et maintenir une qualité de service convenable.

2.3.2.2. Algorithme de voisinage

Nous considérons par voisinage dynamique d'un véhicule toute la région accessible à l'intérieur d'une durée de temps T. Le voisinage d'un appel d'urgence est déterminé par la station centrale, en se basant sur les mises à jour de statuts reçues à sa demande ou en utilisant la mise à jour la plus récente. L'idée est d'identifier rapidement les véhicules candidats pour

répondre à une demande ou remplacer un véhicule envisageant un imprévu. L'algorithme utilisé pour le calcul du voisinage est décrit en annexe 1.

2.3.2.3. Calcul du plus court chemin

Il est parfois nécessaire de modifier un itinéraire en raison des variations dans les conditions de circulation. Dans certains cas, un nouvel itinéraire doit être recalculé rapidement en fonction de la position actuelle du véhicule et des informations de trafic en temps réel.

Lorsque l'étendue du réseau considéré est petite, il est possible d'utiliser la version dynamique de l'algorithme de Dijkstra pour le calcul du plus court chemin. Par contre lorsque la dimension du réseau est large, le temps du calcul utilisant cette version dynamique de l'algorithme de Dijkstra devient important et il faudrait utiliser une méthode plus rapide.

Dans l'étude de Jigang *et al.* [77], les auteurs exploitent le fait que le plus court chemin statique fournit une solution approximative au DSP. En effet, la longueur du plus court chemin statique n'est généralement pas très affectée par les conditions de la circulation, à l'exception des cas d'accidents ou de forte congestion. Il est donc inutile de considérer l'ensemble du réseau, comme dans l'algorithme de Dijkstra, pour calculer le DSP entre une paire de nœuds. Un sous-réseau étendu du plus court chemin statique est suffisant pour supporter le calcul du DSP dans la plupart des cas.

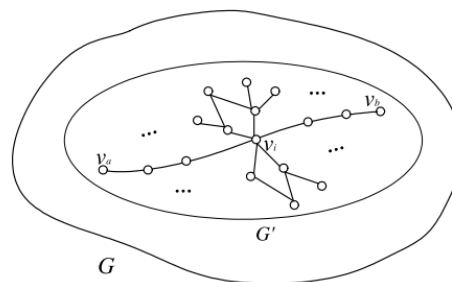


Figure 3-8 Exemple d'un sous-réseau de grade-2 en fonction du chemin P (Jigang *et al.* [77])

Ainsi, un plus court chemin statique L entre une paire de nœuds donnée est calculé dans le réseau et est utilisé comme solution initiale pour le problème dynamique (Figure 3-8). Ensuite, cette solution initiale est affinée en utilisant la version dynamique de l'algorithme de Dijkstra (D_DA) sur un sous-réseau d'étendue moins importante (grade r) extrait du réseau initial.

Un sous-réseau de grade r du réseau $G = (V, E)$, dérivé du chemin L , est un réseau $G' = (V', E')$ tel que $V' = \{v \mid v \in V \text{ et distance}(v, L) \leq r\}$ et $E' = \{(v_i, v_j) \in E \mid v_i, v_j \in V'\}$. [77]

Pour chaque nœud $v_i \in L$, nous dénotons $V_i(r)$ l'ensemble des nœuds voisins qui sont situés à une distance inférieure à r du nœud v_i .

Dans Jigang *et al.* [77], l'étendue du sous réseau de grade r est choisie selon la période du trafic considérée et du degré de congestion reporté. Le pseudo-code de l'algorithme de Jigang *et al.* [77] est présenté en annexe 2.

2.3.2.4. Algorithme d'affectation

Dans son travail, Yang [65] a utilisé une approche de type glouton pour l'affectation de véhicules d'urgence. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de générer très rapidement de bonnes solutions réalisables.

En faisant appel à la notion de zone d'action d'un véhicule, telle que présentée par Zargayouna [61], et qui permet de limiter le nombre de véhicules candidats pour servir une demande, l'approche glouton s'avère bien adaptée à notre contexte.

L'algorithme glouton est défini comme suit:

1. Trier les appels d'urgence en attente en ordre décroissant de priorité. Si des appels ont la même priorité, les trier selon leur temps d'attente dans le système.
2. Sélectionner le premier appel d'urgence sur la liste, jusqu'à ce que tous les véhicules soient affectés ou jusqu'à ce que tous les appels d'urgence soient servis.
3. Déterminer les véhicules présents dans le voisinage de l'appel d'urgence avec l'algorithme de voisinage dynamique.
- 4- Minimiser les réaffectations.
5. Affecter le véhicule le plus proche de l'appel d'urgence et mettre à jour son statut.
6. Augmenter le niveau de criticité du premier appel si le véhicule a dû être dévié de sa route courante.
7. Retirer l'appel d'urgence de la liste et passer à l'étape 2.

Cet algorithme est appliqué lors de la réception d'un nouvel appel de service de priorité moyenne ou minimale. Un traitement spécifique est appliqué pour les appels de haute priorité tel que présenté au scénario 4.

2.4. Séquence décisionnelle :

L'adaptation aux variations de l'environnement menant à des temps de réponse adéquats se traduit par diverses actions de reconfiguration des véhicules qui sont dispersés dans le réseau routier.

Le système de gestion adaptatif décide comment optimiser son architecture de traitement selon les changements observés dans le réseau. La reconfiguration se traduit par des instructions de contrôle acheminées aux véhicules concernés (ex. message de réaffectation, message de changement de parcours, etc.).

L'architecture de traitement du système de gestion adaptatif est conçue ainsi tel un pipeline de classes de traitement, où chaque agent complexe représente une classe (Figure 3.9). Chaque classe (AC) est instanciée par au plus un composant. Le pipeline optimal pour le contexte courant (nouvel appel, perturbation, etc.) aura été identifié au préalable à partir de la base de règles. Dans la Figure 3-4, le signal "Décision" transmet au sous-système de Traitement la configuration d'agents complexes adéquate (i.e. le pipeline optimal) identifiée à partir de la base des règles.

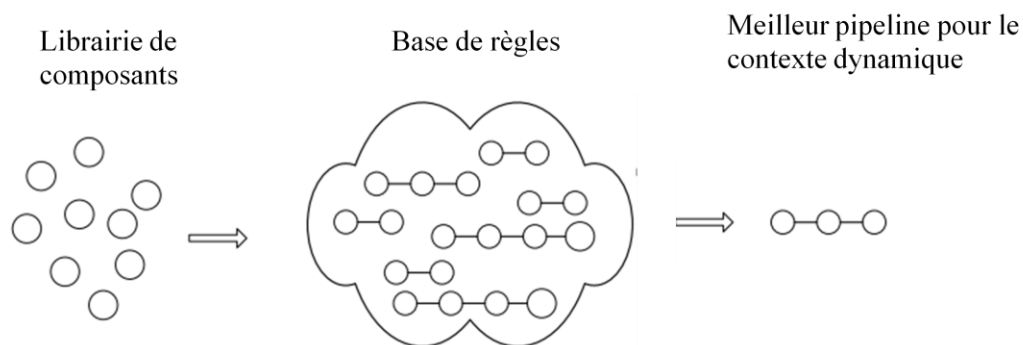


Figure 3-9 Architecture avec des composants reconfigurables (inspirée de [33])

La base des règles de notre travail est présentée dans le Tableau 3. Elle est extensible et de nouveaux scénarios pourraient y être facilement ajoutés vu l'approche reconfigurable utilisée. Les nouveaux scénarios reposeront probablement sur les mêmes entités de traitements (agents complexes) mentionnées précédemment et on pourra en rajouter d'autres entités spécialisées si

nécessaire vu qu'on se base sur la notion d'agents complexes de traitement spécialisés et qui permettent d'encapsuler des fonctions personnalisées.

Tableau 3- Base des règles

Règles	Paramètres d'entrées	Algorithmes
R1	Si Notification de congestion	Alors Scénario de congestion en route
R2	Si Notification de panne	Alors Scénario de panne d'un véhicule d'urgence en route
R3	Si Notification de congestion et Notification de véhicule coincé	Alors Scénario d'un véhicule coincé par congestion
R4	Si Appel de haute sévérité	Alors Scénario d'affectation d'appel de haute priorité
R5	Si Appel de moyenne ou faible sévérité	Alors Scénario d'affectation d'appel

3. Conclusion

Une nouvelle approche de gestion des véhicules d'urgence qui tient compte des incertitudes de l'environnement et repose sur l'usage des nouvelles technologies d'informations pour la collecte et l'échange d'informations a été conçue.

Cette approche fondée sur une résolution contextuelle à base de scénarios et utilisant une architecture reconfigurable permet d'aider les véhicules d'urgence à interagir rapidement avec leur environnement et minimiser les délais d'intervention.

Une base de règles a été définie à partir des principaux événements qui peuvent être rencontrés, pour lesquels nous avons spécifié des algorithmes de traitement appropriés. Des traitements personnalisés ont été définis pour gérer les événements imprévus sur la route

Dans la suite de ce travail, nous allons se concentrer sur l'implémentation de notre approche et son expérimentation sur l'environnement de simulation. Nous testerons notre système de gestion adaptatif vis-à-vis certains scénarios concrets et analyserons son efficacité. Pour ce ceci nous allons comparer le temps de réponse des véhicules de secours sur le terrain lorsque des ré optimisations sont effectuées (telles que celles proposées dans notre étude) à celle lorsque le véhicule maintient sa route planifiée dès le départ.

Chapitre 4 : Simulation et résultats

1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre des études de cas démontrant la mise en œuvre de notre approche de gestion de véhicules d'urgence, dans le contexte des systèmes de transport intelligents (STI). L'objectif de cette étude expérimentale est de montrer l'aptitude de notre approche à répondre efficacement aux aspects dynamiques et imprévisibles de l'environnement. Ainsi, valider qu'une gestion adaptative, telle que suggérée par notre approche, permette de minimiser les délais d'intervention des véhicules d'urgence et d'assurer une meilleure gestion de la flotte des véhicules.

Nous commencerons par présenter l'environnement d'expérimentation, les hypothèses pour l'expérimentation et la modélisation des paramètres. Ensuite, nous décrirons les simulations qui sont basées sur des scénarios de trafic urbain présentant des événements imprévus et discuterons les résultats de nos expérimentations. Comme l'étude est novice et qu'on ne peut pas trouver des échantillons dans la littérature pour comparaison, nous comparerons les routes obtenues avec notre approche avec celles utilisées habituellement par les véhicules d'urgence où aucun traitement des incertitudes de l'environnement n'est envisagé. Ainsi, nous constaterons que notre approche permet d'offrir des temps de réponse dans les délais prescrits, de réduire les délais encourus suite à des changements inattendus dans les conditions de la circulation et de maintenir la stabilité du système de gestion en réduisant les réaffectations en chaîne.

2. Environnement de simulation

Les modèles de simulation par ordinateur sont souvent appliqués aux réseaux de transport puisqu'il n'est généralement pas possible d'expérimenter avec les réseaux réels. Les simulateurs de trafic sont ainsi utilisés pour générer des trajectoires réalistes pour les véhicules. La simulation de la circulation s'est avérée une approche pratique et rentable pour fournir des informations sur le trafic en temps réel et pour appuyer la détection et l'analyse des incidents.

Les systèmes de simulation de trafic ont récemment évolué et fournissent maintenant des outils puissants pour répondre aux exigences de conception et d'analyse en transport ainsi que pour l'élaboration de stratégies de contrôle en ligne. Dans la suite, nous commencerons par

identifier le modèle de simulation le mieux adapté à notre contexte. Le tout sera suivi par une présentation de l'outil de simulation choisi et de notre environnement d'expérimentation.

2.1. Modèle de simulation

Les systèmes de simulation du trafic reposent sur les approches macroscopiques, mésoscopiques ou microscopiques, dépendamment du niveau de détail avec lequel le système est représenté [38], [81].

Les modèles de simulation macroscopiques (ex. METACOR, MASTER, etc.) décrivent l'écoulement global du flux de véhicules, sans aller dans les détails (par exemple, le comportement de chaque véhicule sur les voies) [38]. À l'opposé, les modèles de simulation microscopiques (ex. CORSIM, VISSIM, SUMO) représentent l'évolution individuelle de chaque véhicule et déterminent leurs vitesses, emplacements et interactions. Par conséquent, ils peuvent être utilisés pour représenter le comportement de différents types de véhicules [82].

Les modèles mésoscopiques de simulation de trafic représentent une approche intermédiaire. Des éléments des modèles macroscopiques y sont intégrés ainsi que certaines interactions individuelles qu'on retrouve dans les modèles microscopiques. Plusieurs modèles mésoscopiques ont été développés jusqu'à présent [7], comme CONTRAM, DYNASMART, etc.

Ainsi, les modèles macroscopiques représentent les entités et leurs activités ou interactions à un haut niveau d'abstraction. Les modèles mésoscopiques constituent une solution de compromis, en représentant les entités impliquées de façon plus précise que les modèles macroscopiques (cependant beaucoup moins que les modèles microscopiques) [81]. Les outils de simulation microscopiques demeurent les plus appropriés pour simuler les conditions réelles de circulation afin de tester diverses stratégies de contrôle.

2.2. Outils de simulation SUMO

Pour la phase expérimentale de notre travail, nous avons choisi l'outil de simulation microscopique de mobilité urbaine SUMO (Simulation of Urban MObility). SUMO est un logiciel libre et hautement portable [73].

SUMO est un outil de simulation de trafic purement microscopique où chaque véhicule est explicitement représenté (identifiant, heure de départ, parcours, source, destination, vitesse, etc.). Il se prête ainsi à divers types de recherche, par exemple le problème de choix d'itinéraires,

les algorithmes de gestion de feux de circulation ou encore la simulation de la communication inter-véhiculaire [73]. Cette architecture est utilisée dans de nombreux projets pour simuler et étudier différentes stratégies de gestion du trafic.

SUMO offre par ailleurs la possibilité d'interagir avec une application externe via une connexion socket : il s'agit d'une interface permettant d'opérer les simulations en mode client-serveur. Dans ce mode, le client peut contrôler dynamiquement l'exécution de la simulation routière par l'entremise d'une interface de contrôle de trafic dénommée TraCI (Traffic Control Interface).

2.3. Environnement connecté

Le simulateur microscopique du trafic routier SUMO [73] est utilisé pour modéliser le trafic urbain sur les routes. Nous considérerons le mode client-serveur lors de notre simulation. Comme SUMO nécessite un réseau routier et une demande de trafic, ces données doivent être produites à partir de sources différentes. SUMO initialise alors une simulation en chargeant ces fichiers, se met ensuite en mode serveur et attend les commandes de contrôle qui lui seront fournies via l'interface TraCI.

Notre système adaptatif de gestion de véhicules d'urgence (SAGVU), implémentant notre approche de gestion, joue le rôle du client et contrôle l'exécution de la simulation. Le SAGVU peut contrôler l'avancement de l'horloge, superviser la simulation en interrogeant des éléments physiques du réseau de manière à recueillir les informations nécessaires (par exemple, les positions des véhicules, les vitesses des véhicules, le taux d'occupation des voies, etc.) et/ou modifier leurs comportements (e.g. véhicules, feux de signalisation, etc.).

Les interactions entre le SAGVU et le simulateur de trafic SUMO sont schématisées à la Figure 4-1.

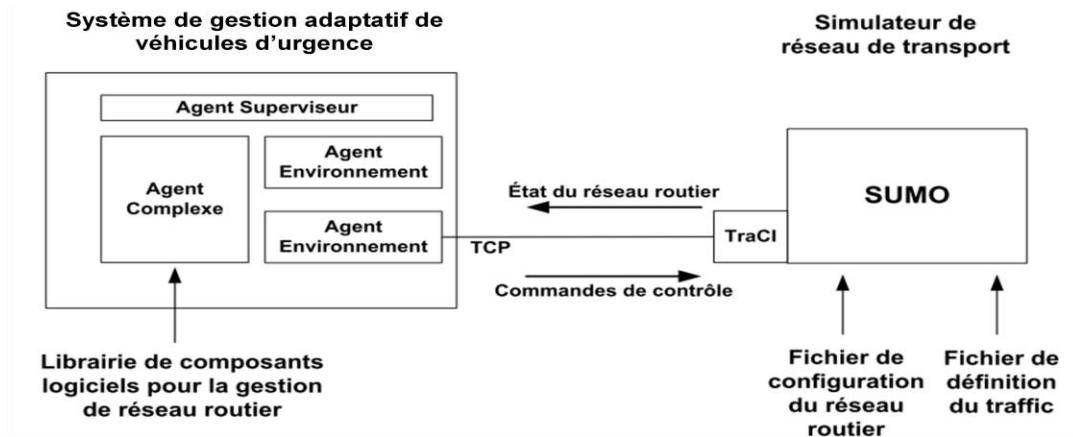


Figure 4-1 Environnement d'expérimentation

Nous présenterons dans les sous-sections qui suivent les détails concernant la configuration et/ou l'implémentation de chacun des éléments de notre environnement d'expérimentation.

2.3.1. Configuration de la circulation urbaine sur SUMO

Nous expliquons brièvement dans cette sous-section la configuration requise pour l'initialisation du simulateur urbain SUMO. Plusieurs applications figurant dans le package de SUMO ont été utilisées pour générer le réseau routier et le trafic routier (itinéraires de véhicules). Les paramètres ainsi que les interactions entre les applications, que nous avons utilisées pour créer notre environnement urbain de simulation, sont schématisés dans la Figure 4-2.

Deux outils, à savoir NETCONVERT et POLYCONVERT, permettent de générer le réseau routier qui sera visualisé via l'interface graphique de SUMO.

NETCONVERT importe les réseaux routiers numériques provenant de sources différentes et les convertit en un format lu par SUMO. Dans ce travail nous avons importé notre réseau de la plateforme libre « OpenstreetMap » [83]. Les feux de signalisation et les bretelles d'accès à l'autoroute sont instanciés par NETCONVERT en utilisant la géométrie des nœuds du réseau.

POLYCONVERT importe les formes géométriques provenant de différentes sources (eau, parc, forêt, bâtiments, résidences, etc.) et les convertit en une représentation visualisable sur l'interface graphique de SUMO.

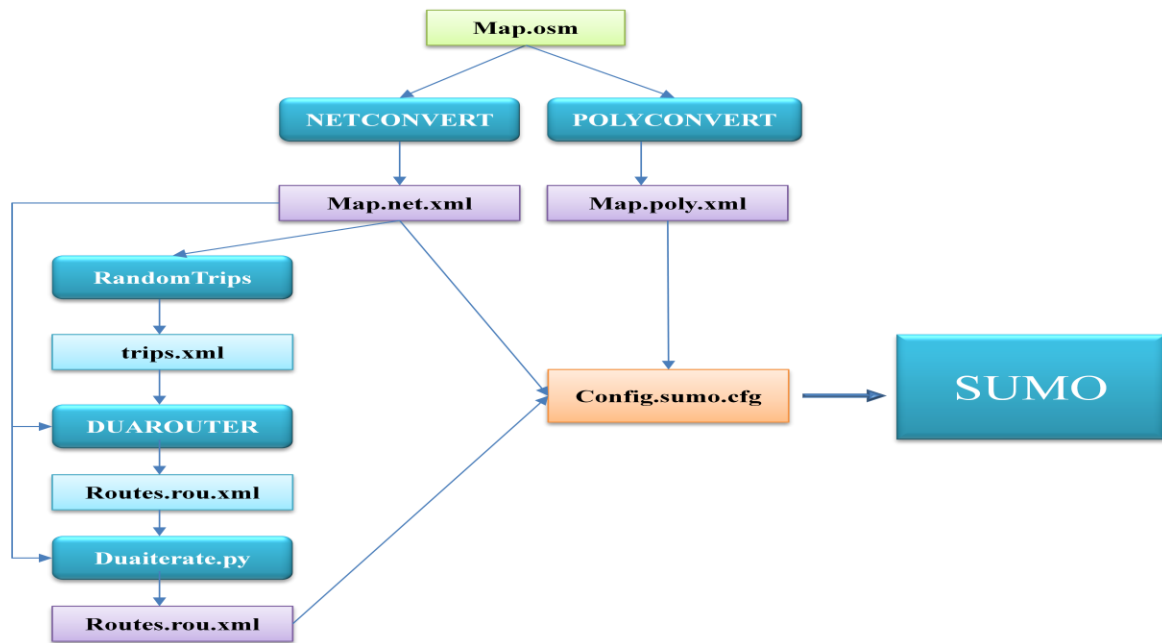


Figure 4-2 Fichiers de configuration de la circulation urbaine

Une fois que le réseau routier est prêt, l'étape suivante consiste à générer le trafic routier durant la période de la simulation. Ce dernier est créé en utilisant les outils RandomTrips, DUAROUTER puis optimisé en utilisant Duaiterate.py.

RandomTrips génère un ensemble de définitions d'itinéraires aléatoires de véhicules pour un réseau donné durant une période donnée. Ceci est fait en choisissant une source et une destination soit uniformément au hasard soit pondérées par la longueur des routes (distance), le nombre de voies des routes du réseau ou les deux à la fois.

DUAROUTER importe les définitions produites (trip.xml) et calcule des itinéraires de véhicules. Le résultat est une spécification complète des véhicules et de leurs routes respectives : ID, couleur, vitesse maximale, destination, temps de départ, route, etc. Toutefois, le trafic routier produit est très aléatoire et les congestions sont très fréquentes (condensation de trafic dans certains endroits seulement).

L'outil « Duaiterate.py » permet d'améliorer le trafic routier produit en appelant DUAROUTER itérativement pour la construction des routes des véhicules, soit en considérant l'état de la circulation à l'itération précédente pour la construction des nouvelles routes à

l'itération courante. La configuration de trafic routier produite après plusieurs itérations est moins aléatoire et plus fluide.

La dernière étape avant d'initialiser SUMO est de créer un fichier de configuration (config.sumo.cfg) pointant vers tous les fichiers que SUMO utilisera pour son initialisation à savoir, dans notre cas, le fichier de la carte réseau (map.net.xml), le fichier du trafic routier (routes.rou.xml) et le fichier des formes géométriques (map.poly.xml).

2.3.2. Interface TraCI

L'interface TraCI est une extension de SUMO qui fournit un canal de communication avec SUMO. La bibliothèque de commandes dans TraCI est vaste et comprend le contrôle de plusieurs éléments tels que les véhicules, les feux de signalisation, les routes, les liens, etc.

Le package de SUMO vient avec une interface TraCI codée en Python. Cependant, plusieurs chercheurs ont développé des interfaces compatibles avec d'autres langages de programmation. Récemment, TraCI pour Matlab [84] et TraCI pour Java (traci4j) [85] ont été introduites. Ces dernières ne sont pas aussi complètes que celle codée en Python mais elles fournissent l'essentiel.

Dans notre travail, nous avons opté pour une programmation dans un environnement orienté objet utilisant le langage Java. Nous avons donc utilisé l'interface TraCI pour Java, que nous avons complété avec les commandes nécessaires pour le contrôle de notre simulation.

2.3.3. Configuration et implémentation du SAGVU

Le système adaptatif de gestion de véhicules d'urgence, implémentant l'approche de gestion proposée, initialise d'abord la configuration avec les données nécessaires (éléments du réseau, flotte de véhicules), puis supervise l'avancement du pas d'horloge et le déroulement de la circulation urbaine et amène les mises à jour d'informations à réaliser. Il convient de noter que dans la simulation une collecte d'informations peut s'effectuer instantanément à chaque pas d'horloge, qui correspond à une seconde dans SUMO. En recueillant et analysant les données associées aux différents éléments du réseau, le SAGVU est en mesure d'optimiser l'affectation et le routage des véhicules d'urgence.

Tel que mentionné au chapitre précédent, le SAGVU adopte une approche contextuelle à base de scénarios et repose sur une architecture reconfigurable. Il offre des traitements spécifiques adaptés à chaque scénario en utilisant des composants communs de l'architecture. Le résultat de la reconfiguration se traduit par des instructions de contrôle acheminées aux véhicules concernés (ex. message de réaffectation, message de changement de parcours, etc.).

Dans notre simulation, les agents environnements (éléments de gauche dans la Figure 4-1) désignent les véhicules, les voies de circulation, les feux de signalisation, les senseurs, etc. que le SAGVU supervise et interroge fréquemment pour collecte des données et acheminement des instructions de contrôle. Les agents complexes (ACs) désignent quant à eux les différentes entités spécialisées de traitements. Leur fonction est de traiter les informations générées par les agents environnements et prendre des décisions de gestion ou de contrôle.

Plusieurs types d'AC spécialisés sont définis pour le traitement des informations. Ceux-ci peuvent d'ailleurs travailler concurremment. Nous considérons par exemple un AC affectation qui prend en charge l'exécution des décisions d'affectation ainsi que la minimisation des réaffectations, un AC voisinage qui calcule les zones d'action dynamiques des véhicules et sélectionne les véhicules candidats, etc. Une sélection définie de ces ACs est utilisée à chaque contexte et cette sélection est déterminée par l'agent station dépendamment du scénario considéré.

Nous implémentons aussi des ACs de contrôle et statistiques. Par exemple, un AC trafic est dédié au calcul des statistiques afin de déterminer les estimations des vitesses agrégées sur les liens, les densités des véhicules sur les liens, etc. Un autre AC détecteur de congestion supervise les variations des flux de trafic sur les liens et produit une notification en cas de détection de congestion.

Pour réduire la complexité du problème et permettre une meilleure analyse des résultats, nous considérons dans cette étude expérimentale une seule zone d'appel et une seule station de traitement. Ainsi, le rôle de l'agent superviseur est réduit à la réception des événements, tels que les appels d'urgence et les notifications de congestion, et la transmission des requêtes de traitements vers l'agent AC station. Nous avons fait abstraction des autres fonctionnalités qui nécessitent la prise en considération de plusieurs agents AC station ou d'une couverture

géographique plus importante comme les fonctionnalités liées à l'équilibrage de la charge de traitement entre les AC_station ou encore le choix de l'agent AC station approprié.

Pour tester notre système, nous avons introduit des événements imprévus dans la configuration de la circulation routière ainsi définie. Le SAGVU exécute l'événement imprévu pour le scénario considéré et supervise ensuite la flotte afin d'effectuer les adaptations nécessaires. Une vue générique des traitements de notre SAGVU et de ses interventions avec le simulateur urbain SUMO sont décrites dans la Figure 4-3.

Il convient de noter que dans le sous-module de détection d'événements imprévisibles, la source de perturbation dans l'environnement est soit détectée par le système, comme en cas de congestion, soit rapportée par les véhicules, comme lors d'une panne en cours de route.

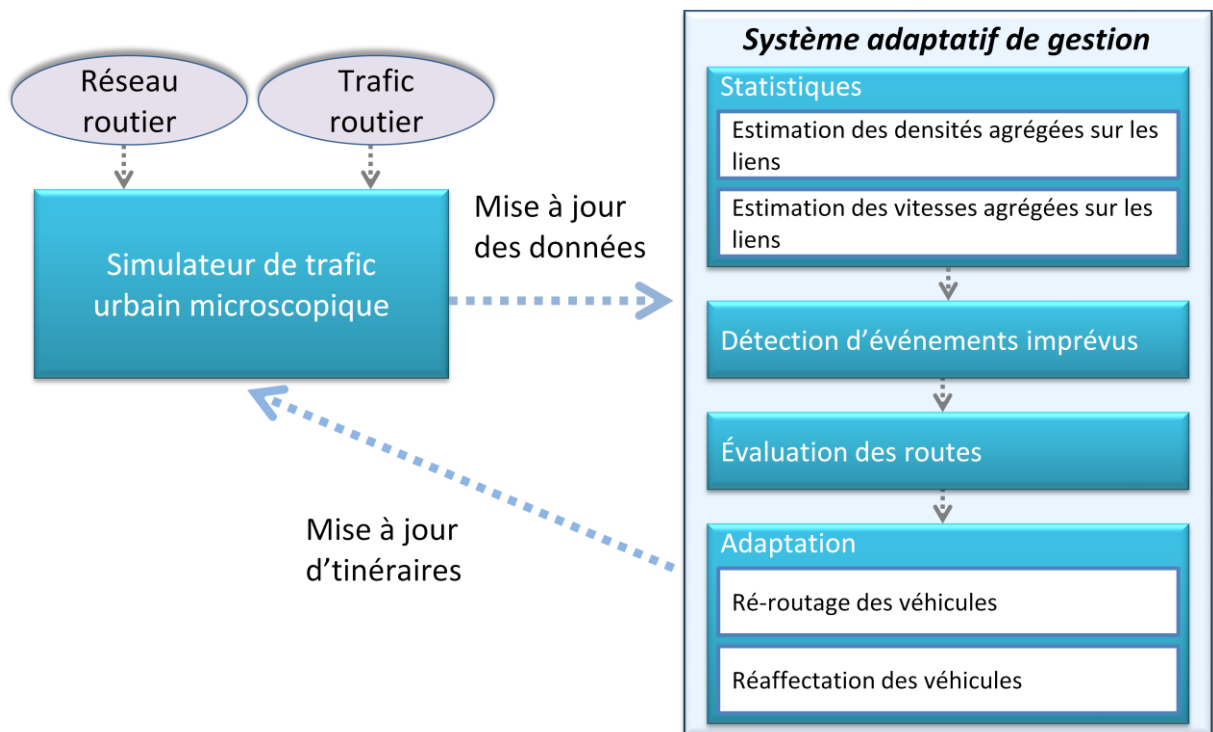


Figure 4-3 Framework de simulation

2.4. Paramètres d'entrée de la simulation

Le réseau routier utilisé dans notre simulation correspond à une partie de la région de Hull à Gatineau, présentée dans la Figure 4-4, téléchargée à partir de l'outil « OpenStreetMap ». Nous considérons l'hôpital Pierre Janet, localisé sur la rue Pharand, comme dépôt des véhicules d'urgences.

Le trafic routier est créé pour une période de 2000 secondes pour un trafic mixte (voitures, petits camions, gros camions, bus, etc.).

Il est à noter que les véhicules générés entament généralement leurs routes à partir des extrémités du réseau considéré. Ainsi les premières minutes de la simulation sont utilisées pour peupler les routes du réseau avec les véhicules et fournir les premières statistiques sur les conditions de circulation. Il s'agit de la « période d'initialisation » et elle correspond expérimentalement à une période de 300s. Les feux de signalisations utilisés lors de la simulation sont des feux statiques avec des cycles fixes. Nous nous situons pour cette étude en dehors des heures des pointes pour mieux saisir les effets des événements imprévus.

Pour tester notre approche de gestion, nous avons considéré une flotte de 7 véhicules d'urgence (EV0 à EV6 dans le Tableau 4) qui seront initialisés après la « période d'initialisation ». Ainsi, les véhicules d'urgence seront lancés sur le réseau routier au temps $t=310s$ de la simulation et seront mis en route vers leurs destinations initiales.

Nous avons opté pour une distribution initiale variée des états des véhicules, de leurs positions ainsi que de la sévérité des appels en cours de service, si applicable. Nous rappelons que les véhicules d'urgence peuvent être dans l'un des états suivants :

- Libre (en stationnement ou en patrouille).
- En route vers un site d'urgence
- Chargé et en route vers un hôpital (occupé)
- En traitement sur site (occupé)
- En recharge (hors service)

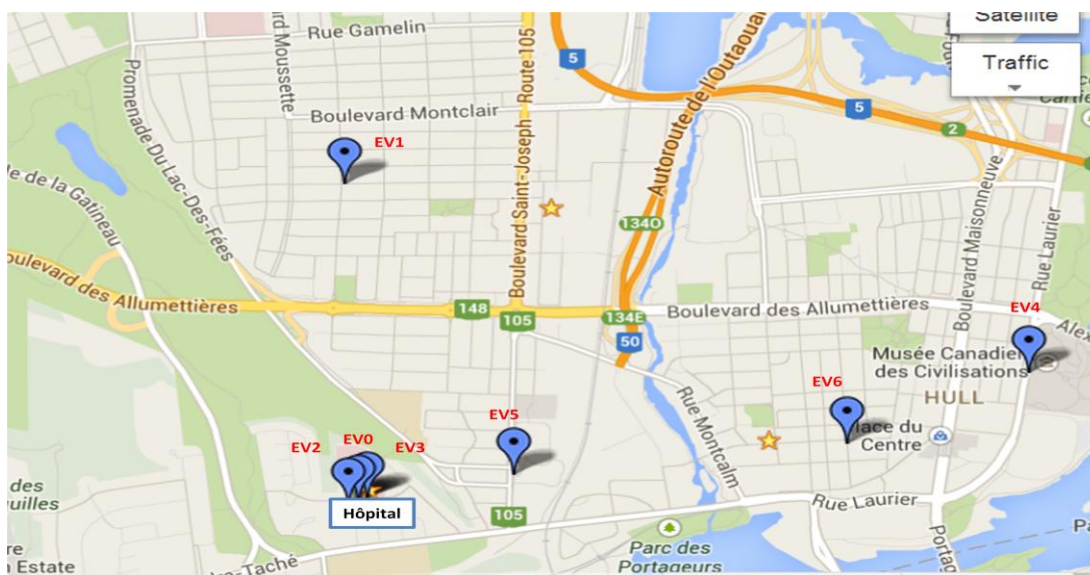
Trois niveaux de sévérité des appels sont considérés dans notre étude à savoir haut (3), moyen (2) et faible (1).

Nous avons ainsi considéré initialement des véhicules en route vers des sites d'urgence de sévérité différente, d'autres qui retournent vers l'hôpital en transportant des patients, certains autres en patrouilles et un dernier en attente dans le stationnement de l'hôpital. Les données initiales des véhicules d'urgence lors de leurs initialisations sont résumées dans le Tableau 4.

Tableau 4- État initial de la flotte de véhicules d'urgence

EV label	État initial	Position initiale	Destination initiale	Sévérité de l'appel servi initialement
EV0	Libre - parking	Hôpital Rue Pharand	n/a	n/a
EV1	Chargé -en route vers l'hôpital	Chez un patient Rue Dumas	Hôpital Rue Pharand	1
EV2	En route vers un site d'urgence	Hôpital Rue Pharand	Rue Chauveau	3
EV3	En route vers un site d'urgence	Hôpital Rue Pharand	Rue Papineau	2
EV4	Libre- patrouille	Rue Saint-Joseph	n/a	n/a
EV5	Libre- patrouille	Rue Laurier	n/a	n/a
EV6	Chargé -en route vers l'hôpital	Chez un patient Rue Wright	Hôpital Rue Pharand	2

La région étudiée ainsi que la localisation géographique des véhicules d'urgence au temps $t=310s$ de la simulation sont présentées dans la Figure 4-4 ci-dessous.


Figure 4-4 Localisation géographique initiale des véhicules d'urgence

2.5. Collecte, agrégation et contrôle des données

Comme nous avons déjà décrit les ACs traitements (AC voisinage, AC diversion, AC affectation, etc.) de notre SAGVU au chapitre précédent, nous allons nous attarder dans cette section aux modules ACs de calculs statistiques et de contrôle. Ces derniers travaillent en coopération avec le simulateur SUMO pour la collecte et l'analyse des données sur les éléments du réseau.

2.5.1. Collecte des données

Deux ensembles de données sont recueillis de façon répétitive pour l'analyse. L'un est l'information sur la vitesse moyenne des véhicules sur chaque tronçon de route ou lien (lien entre deux intersections successives) à chaque pas d'horloge. Elle comprend des informations telles que l'ID du lien, le pas d'horloge, les vitesses moyennes des véhicules sur cette route si elles sont disponibles sinon la vitesse maximale allouée sur ce lien, etc. Ces vitesses moyennes calculées sur des intervalles de temps prédéfinis permettent de déterminer la vitesse agrégée des véhicules sur chaque lien, ce qu'on appelle « états de route agrégée » qui représente la « vérité terrain » de la circulation.

Les autres données intéressantes sont les informations sur le parcours de chaque véhicule d'urgence de la flotte. Nous enregistrons à chaque demande de mise-à-jour les données relatives à chaque véhicule tels l'emplacement, la vitesse, la route, la destination, etc. dans le réseau routier simulé.

2.5.2. Estimation des vitesses agrégées sur les liens

Dans ce travail, les états de la circulation en temps réel sont caractérisés par les vitesses moyennes sur les artères urbaines agrégées sur un intervalle de temps. Pour chaque intervalle d'agrégation, les vitesses moyennes des véhicules sont d'abord recueillies auprès des différentes liaisons routières et sont ensuite agrégées pour fournir des estimations des conditions moyennes sur ces liaisons routières.

Les travaux antérieurs sur l'estimation de la circulation (ex. [86], [87], [88]) indiquent qu'un intervalle d'agrégation de 5 à 10 minutes semble un choix raisonnable afin de tenir compte à la fois de l'exigence temps réel et de la disponibilité des données. Toutefois, cette valeur s'avère assez grande pour un système de gestion de véhicules d'urgence vu que le parcours d'un véhicule est, en général, inférieur à 8 minutes. Si nous considérons un tel intervalle pour l'agrégation (i.e. de 5 à 10mn), les mises à jour en temps réel pourraient s'avérer très en retard, voire inutiles. En effet, si une congestion se produit sur une route, elle ne sera détectée que lorsque le véhicule d'urgence sera coincé même si ce dernier était assez éloigné du site de la congestion lors de son occurrence.

Un intervalle d'agrégation de 2 à 3mn paraît beaucoup plus raisonnable dans le cas de la gestion des véhicules d'urgence puisqu'il permet une supervision plus précise des parcours des

véhicules et une réponse plus rapide aux imprévus. En effet, si on regarde par exemple le cas d'une crise cardiaque un délai de 2mn peut être décisif pour la vie du patient.

Durant notre simulation, la collecte des vitesses moyennes sur les tronçons des routes se fait tous les 10s, pour ne pas trop alourdir la simulation et s'approcher de la réalité. Une agrégation est faite à toutes les 2mn. Ainsi, les congestions sur les routes peuvent être détectées plus rapidement et mieux gérées.

2.5.3. Détection des congestions

Le module de détection de congestion se base sur la comparaison des vitesses agrégées sur les liens avec certains seuils. Ces seuils de vitesse sont déterminés en tenant compte de la classification des vitesses de circulation en milieu urbain dans la littérature (ex. [88], [89]).

On distingue quatre niveaux de conditions de trafic, à savoir, vert, rouge, orange et jaune selon les vitesses de déplacement sur les liens et selon les types des liens le Tableau 5 récapitule ces différents niveaux.

Tableau 5- Classification de l'état du trafic routier selon les vitesses de circulation [89]

Etat / Type de lien	Artère urbain ($\geq 60\text{Km/h}$)	Sous artère urbain ($60-40\text{Km/h}$)	Route auxiliaire ($< 40\text{Km/h}$)
Niveau vert (trafic fluide)	> 42	> 34	> 25
Niveau jaune (trafic moyen)	$30 \sim 42$	$24 \sim 34$	$16 \sim 25$
Niveau orange (congestionné)	$22 \sim 30$	$18 \sim 24$	$11 \sim 16$
Niveau rouge (très congestionné)	< 22	< 18	< 11

Le module de détection de la congestion compare à la fin de chaque intervalle d'agrégation les vitesses agrégées calculées sur chacun des liens aux valeurs seuils et déclenche une notification de congestion à l'agent superviseur si la congestion est de niveau rouge ou orange. La sévérité de la congestion est définie par le nombre d'intervalles d'agrégation consécutifs pour lesquels un lien est de niveau rouge.

À la fin de chaque intervalle d'agrégation, le module de détection de congestion envoie à l'agent superviseur la liste des liens congestionnés classés selon leur sévérité. Ce dernier la

transmet à son tour à l'AC station de la zone concernée (dans notre cas, il y a un seul agent station).

A la réception de la notification de congestion, l'AC station filtre les liens qui sont sur les routes des véhicules d'urgence en route vers un site ou en route vers un hôpital seulement, ignore les autres, et déclenche les traitements appropriés.

2.6. Hypothèses de simulation

Nous considérons dans cette étude la norme de l'agence nationale de protection des incendies (NFPA «National Fire Protection Association») [2] concernant le temps maximal d'arrivée des premiers secours sur site. Ainsi les véhicules d'urgence doivent arriver sur le site dans les 5mn qui suivent la réception de l'appel.

Ces appels d'urgence sont classés en trois niveaux à savoir: haut (3), moyen (2) et faible (1). La sévérité d'un appel définit sa tolérance aux délais. Ainsi moins l'appel est sévère, plus grande est sa tolérance à la réaffectation du véhicule qui part à son service vers un autre appel de criticité plus importante.

Tel que mentionné au chapitre précédent, seuls les véhicules en état libre ou en route vers un site d'urgence de sévérité moins élevée seront considérés par le SAGVU lors du processus de réaffectation.

La réaffectation d'un véhicule à un autre appel d'urgence engendre des délais supplémentaires pour l'appel en cours. Nous avons donc introduit une pénalité (β), i.e. un coût supplémentaire sur les temps de parcours, lors de la sélection des candidats potentiels. Cette pénalité est calculée en prenant en compte à la fois la sévérité de l'appel en cours et le nombre de fois que le véhicule a été réaffecté. Plus précisément :

$$\text{Pénalité} = \text{sévérité de l'appel en cours} * \text{nombre de réaffectations}$$

Lorsque plusieurs candidats existent, un véhicule en route vers un site d'urgence ne sera réaffecté que si le bénéfice en temps de réponse est supérieur à un certain seuil τ . Dans la littérature portant sur le routage et l'affectation des véhicules d'urgence ([19], [35], [90]), on fait varier cette valeur entre 0 et 10 mn. Plus grande est cette valeur, plus la déstabilisation du système de gestion due à des réaffectations simultanées est réduite. En fait, elle est presque nulle

à partir de 5mn. Dans notre cas, comme nous cherchons un compromis entre les délais et les réaffectations simultanées, nous avons choisi une valeur de τ égale à 60s qui permet une bonne stabilisation au prix d'un délai acceptable.

Finalement, puisque le simulateur prend quelques secondes pour déterminer les ré-routages ou réaffectations nécessaires en fonction de la situation et que les nouvelles routes doivent tenir compte des emplacements des véhicules à la fin et non au début des calculs, nous considérons le lien qui suit dans la route d'un véhicule d'urgence comme étant son emplacement courant, si le véhicule traverse l'intersection ou en est suffisamment proche (distance parcourue sur le lien actuel est plus grande que la moitié de sa longueur).

Exemple de route d'un véhicule d'urgence : {a, b, c, f..., i}

Hypothèses de réaffectation retenues:

- ✓ Un véhicule en service à un site d'urgence ne peut être réaffecté.
- ✓ Un véhicule en route vers un hôpital ne peut pas changer de destination.
- ✓ Une pénalité est introduite lors du calcul du temps de parcours prévu d'un véhicule d'urgence candidat s'il est en route vers un autre site d'urgence.
- ✓ Un changement d'itinéraire n'est effectué que lorsque le gain en temps de parcours par rapport à un véhicule candidat libre est plus grand que τ . Dans notre cas τ sera égal à 60s.
- ✓ Lorsqu'un véhicule d'urgence est en route vers un site, suite à un premier appel, et qu'il est ensuite réaffecté à un appel plus critique, la sévérité du premier appel est augmentée afin de maintenir un temps de réponse acceptable.
- ✓ On considère le lien suivant dans la route d'un véhicule d'urgence comme étant son emplacement actuel lors du calcul des temps de parcours si le véhicule traverse une intersection ou en est suffisamment proche.

2.7. Indice de performance utilisé

L'indice principal de l'efficacité du processus d'affectation et de routage est le délai pour répondre à un appel d'urgence. Pour calculer ce délai, nous comparons les temps de parcours planifiés ou prévus lors de l'affectation des véhicules à ceux mesurés réellement.

Un compteur dédié permet de surveiller le temps de parcours réel de chacun des véhicules de la flotte. Lorsque le départ planifié d'un véhicule a lieu à l'instant t , SUMO place ce véhicule à l'emplacement de départ spécifié. À ce moment, un compteur spécifique sur la durée du parcours de ce véhicule est lancé. Il faut noter que si la circulation courante ne permet pas de positionner le véhicule à son emplacement de départ en toute sécurité, SUMO essaiera à nouveau lors des prochains pas d'horloge. Ce compteur est remis à zéro si le véhicule est réaffecté à une autre destination.

3. Expérimentation et résultats

Pour tester notre SAGVU nous avons considéré des scénarios spécifiques. Vu que les événements d'arrivée de nouveaux appels de criticités différents sont extensivement étudiés dans la littérature. On ne considérera les traitements reliés à ces événements que lors de la construction des premières routes des véhicules d'urgence (Tableau 4). On s'intéressera plutôt dans cette étude expérimentale à l'examen de l'effet de l'incertitude de l'environnement sur les routes planifiées. Pour ceci, on testera plutôt les événements reliés à l'occurrence de congestions et de pannes.

On simulera spécifiquement deux scénarios typiques à savoir l'occurrence de congestion, sans que le véhicule d'urgence n'y soit déjà immobilisé, et l'occurrence la panne de véhicule. Ces deux scénarios regroupés modélisent l'événement d'occurrence d'une congestion proche de l'emplacement du véhicule d'urgence en route et l'immobilisation de ce dernier.

Dans chaque scénario considéré, nous introduisons un événement imprévu dans la configuration de la circulation routière. Ce dernier affectera les routes planifiées d'un ou de plusieurs véhicules d'urgence. Nous comparons par la suite les résultats de notre approche avec les cheminements habituels des véhicules d'urgence. Spécifiquement nous comparons les temps de parcours et les délais encourus dans chacun des deux cas. Nous présentons dans ce qui suit les détails des paramètres utilisés pour chacun des scénarios envisagés, suivi d'une légende du déroulement des événements et les résultats obtenus.

Rappelons que notre objectif est de démontrer que notre SAGVU permet de réduire les délais d'intervention des véhicules d'urgence. Le critère de stabilité du système de gestion défini par la minimisation des réaffectations en chaîne est intégré à notre étude.

3.1. Scénario de congestion en route

Dans ce scénario, nous simulons l'occurrence d'une congestion dans la route d'un véhicule d'urgence qui ne sera détectée, avec les mises à jour en temps réel des vitesses agrégées sur les liens, qu'une fois le véhicule déjà en route. Ainsi, la route du véhicule d'urgence, telle que planifiée à son départ, devient non optimale quelques instants après.

Nous considérons la flotte des véhicules d'urgence telle que décrite au Tableau 4. Nous nous intéressons plus spécifiquement dans ce scénario au véhicule d'urgence EV2 qui sera acheminé vers un site de secours alors qu'un événement imprévu se produira durant son parcours.

3.1.1. Planification initiale de la route du véhicule d'urgence

Suite à la réception d'un appel de secours, un véhicule d'urgence est acheminé au temps $t=310s$ vers la rue Chauveau.

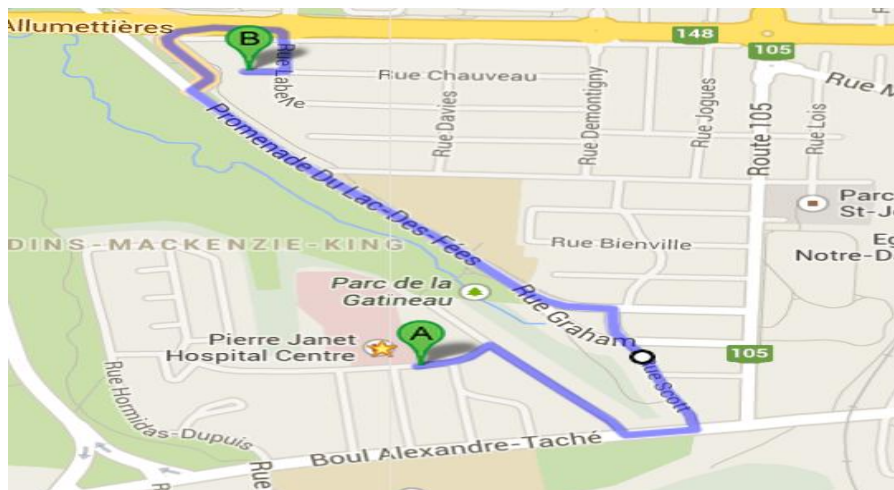


Figure 4-5 Route planifiée initialement au véhicule d'urgence EV2

La description de la route planifiée telle que présentée à la Figure 4-5 est la suivante :

- Véhicule : EV2
- Source : l'hôpital de Pierre Janet, rue Pharand.
- Destination : Rue Chauveau.

- Route : à travers la promenade Lac-Des-Fées.
- Durée estimée : 5mn.
- Sévérité de l'appel : 3.

3.1.2. Insertion de l'événement imprévu

Un gros camion tombe en panne sur la promenade Lac-Des-Fées 40s avant le départ du véhicule, tel qu'illustré à la Figure 4-6. La congestion créée par cette panne se produit au début de l'intervalle d'agrégation des vitesses moyennes et ne sera reportée qu'à la fin de l'intervalle, de telle sorte qu'elle n'est pas prise en compte lors de la planification initiale des routes des véhicules d'urgence. De ce fait, la route du véhicule d'urgence EV2 n'a pas pris en compte cet événement.

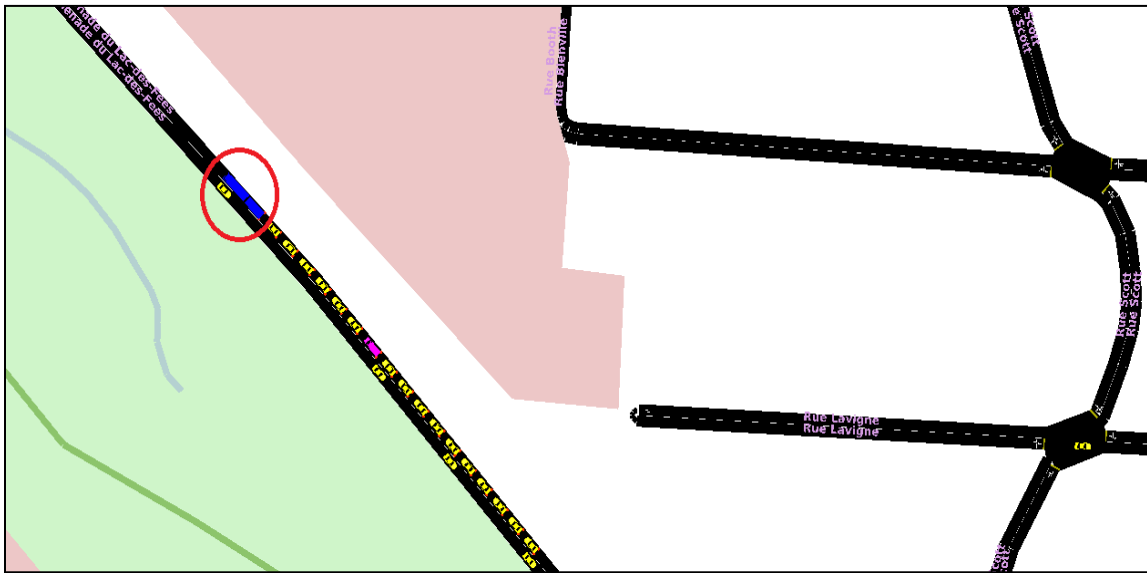


Figure 4-6 Camion en panne sur la route du véhicule d'urgence (prise de SUMO)

3.1.3. Description du déroulement du scénario

Pour tester l'efficacité de notre système en termes de délais, un véhicule d'urgence test est acheminé à la même destination que le véhicule d'urgence de notre scénario (EV2). Ce dernier sera affecté à la même route que celle décrite en 2.1.1. (Planification initiale de la route du véhicule d'urgence). Toutefois, il n'est pas géré par notre SAGVU et conserve sa route initiale planifiée. Par contre, une fois que l'intervalle d'agrégation des vitesses moyennes sur les routes arrive à sa fin, les états des routes agrégées peuvent être déterminés, l'AC détecteur de congestion détecte la congestion et l'AC station est alerté.

Ce dernier sollicite alors les mises à jour d'état à tous les véhicules de sa flotte, détermine ceux qui sont en service et appelle les modules AC distance et AC comparaison de route à travailler concurremment pour détecter les véhicules qui sont proches et passeront par le point de congestion pour ensuite les trier selon leur proximité. Par la suite, le module AC diversion est appelé à fournir de nouvelles routes aux véhicules sélectionnés. Ainsi, une nouvelle route est calculée pour EV2 et lui est communiquée avant qu'il ne soit coincé dans la congestion. Dans ce cas, EV2 est encore loin du point de la congestion et la mise à jour de sa route se fait avec succès.

Comme dans la vie réelle, les véhicules dans SUMO prennent parfois du temps pour se réajuster aux changements d'itinéraire. Par exemple, si un véhicule doit changer de voie pour le prochain virage, il devra trouver une fenêtre (un écart dans la circulation) pour le faire. Par conséquent, bien que la transmission des informations se produise instantanément dans la simulation, leurs effets ne sont pas nécessairement immédiats.

Pour bien comprendre le déroulement du scénario, la Figure 4-7 décrit pas à pas les occurrences des événements durant la période de simulation.

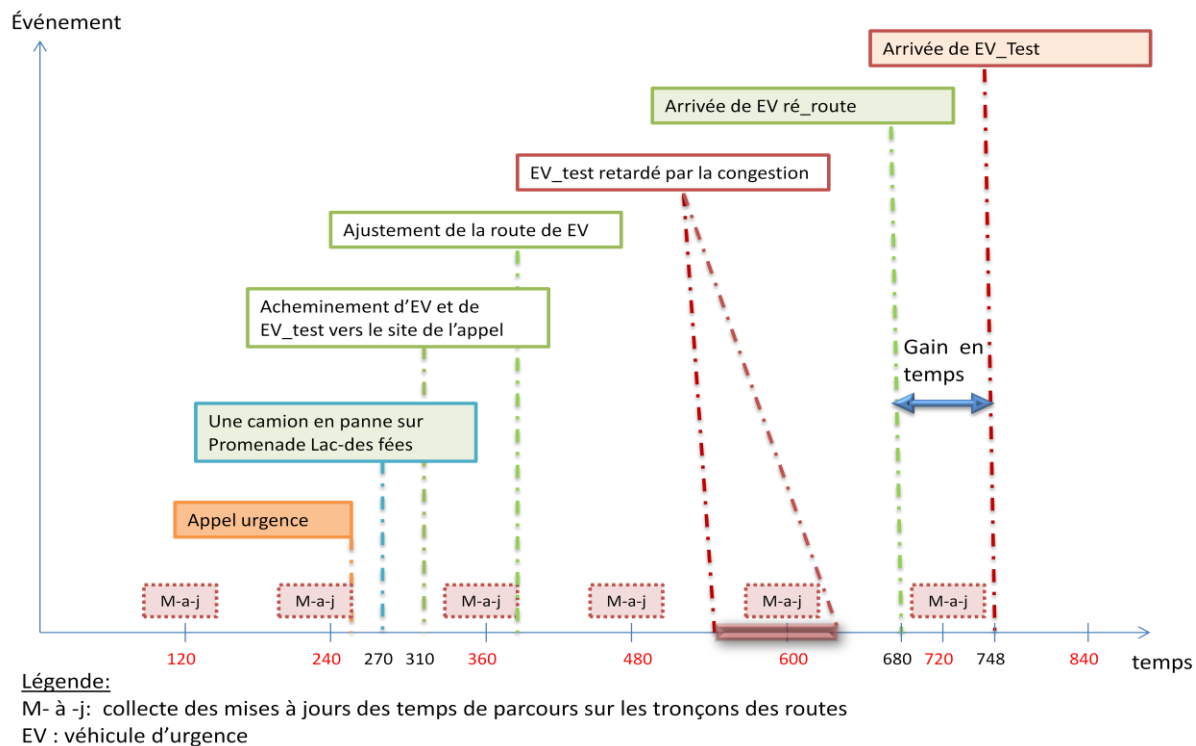


Figure 4-7 Déroulement du scénario 1

La nouvelle route du véhicule EV2, telle que déterminée par notre SAGVU à partir de sa position courante, est présentée à la Figure 4-8.

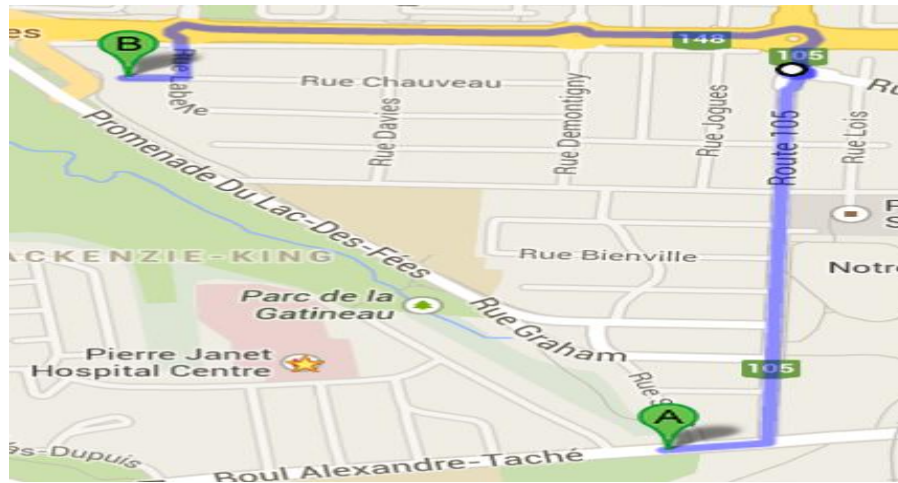


Figure 4-8 nouvelle route du véhicule EV2

- Localisation actuelle du véhicule d'urgence (EV) : Rue Alexandre Taché
- Position actuelle du EV: 55 m
- Temps de parcours écoulé: 52s.
- Nouveau temps de parcours prévu: 205 s.
- Nouveau temps de parcours total : 257s.
- Route : à travers la rue Saint-Joseph.
- Délai prévu : 15s

Le nouveau temps de parcours total correspond à la somme du temps de parcours écoulé et du nouveau temps de parcours prévu, à partir de la position actuelle du véhicule, après son ré-routage.

Le délai prévu après ré-routage correspond à la différence entre le nouveau temps de parcours total et le temps de parcours planifié au départ du véhicule.

3.1.4. Résultats

Comme le véhicule d'urgence EV2 n'est pas encore coincé dans la congestion créée par le camion en panne sur sa route, l'ajustement de sa route permet d'épargner du temps et ce dernier arrive à sa destination avant EV_test, bien que sa nouvelle route soit plus longue. Le Tableau 6 montre les améliorations réalisées. Le temps de parcours d'EV_test est nettement loin de ce qui avait été planifié.

Tableau 6- Temps épargné par le reroutage d'EV2 par le système de gestion adaptatif

labels	Temps de parcours prévu (s)	Temps de parcours réel (s)	Distance parcourue (m)	Durée de la congestion	Délai estimé (s)	Délai réel (s)	Temps épargné (s)
EV2	257	379	3057.23	0	15	122	83
EV_Test	242	447	2452.71	240	0	205	

Délai réel = Temps de parcours réel - temps de parcours prévu

Temps épargné = Temps de parcours réel de EV_test- temps de parcours réel de EV2

Il est à noter que les sources d'erreurs dans les temps de parcours estimés par rapport aux temps de parcours réels sont dues en grande partie au fait que les véhicules qui circulent sur les réseaux routiers urbains demeurent immobiles pendant un certain temps (généralement 30-60 secondes) aux feux de signalisation aux intersections. Comme les estimations des vitesses agrégées ne représentent que des vitesses moyennes, elles ne peuvent refléter avec exactitude les temps d'arrêt aux feux de signalisation.

De plus, SUMO ne présente pas de fonctionnalités spécifiques pour les véhicules d'urgence. Ceux-ci n'ont donc pas de priorité sur les autres véhicules et ne peuvent pas traverser aux feux rouges. Leur comportement simulé est donc le même que celui de tous les autres véhicules du réseau routier.

Dans le Tableau 7, nous avons fait varier la durée de la congestion rencontrée sur la route du véhicule EV_test et nous avons mesuré le temps épargné par la nouvelle route du véhicule EV2 avec le SAGVU. Nous remarquons que le temps épargné passe de 15% à 30% lorsque la durée de la congestion passe de 4 mn à 7.3 mn. Ceci représente un gain important vu que les événements imprévus en cours de route peuvent avoir des durées beaucoup plus importantes que ce que nous avons considéré.

Tableau 7- Variation du temps épargné avec l'ampleur de la congestion

Durée de la Congestion (s)	Temps de parcours prévu (s)		Temps de parcours réel (s)	Délai réel (s)	Temps épargné (s)
240	EV2	257	379	122	83
	EV_Test	242	447	205	
390	EV2	257	400	143	115
	EV_Test	242	515	273	
460	EV2	257	408	151	178
	EV_Test	242	571	329	

3.2. Scénario d'un véhicule en panne

Dans ce scénario, nous simulons l'occurrence d'une panne d'un véhicule d'urgence en route vers un site de secours. La panne arrive à mi-chemin de la route du véhicule considéré. Ainsi le véhicule ne peut plus terminer sa route vers le site de l'appel de secours et contacte le centre de répartition de véhicules d'urgence, représenté par le SAGVU, pour l'informer de la situation.

La flotte de véhicules d'urgence décrite au Tableau 4 est considérée. Nous reprenons dans ce scénario la route du véhicule d'urgence EV2 du scénario précédent avec les mêmes spécifications, sauf que cette fois-ci c'est le véhicule lui-même qui tombe en panne à mi-chemin.

3.2.1. Planification initiale de la route du véhicule d'urgence

Suite à la réception d'un appel de secours, un véhicule d'urgence est acheminé à $t=310s$ vers la rue Chauveau. Nous rappelons ci-dessous la description de la route planifiée telle que présentée à la Figure 4-5.

- Véhicule : EV2
- Source : l'hôpital de Pierre Janet, rue Pharand.
- Destination : Rue Chauveau.
- Route : à travers la promenade Lac-Des-Fées.
- Durée estimée : 5mn.
- Sévérité de l'appel : 3

3.2.2. Insertion de l'événement imprévu

Le véhicule d'urgence EV2 tombe en panne sur la promenade Lac-Des-Fées 150s après son départ. Cette panne l'oblige à ralentir et à s'arrêter au bord de la route telle qu'illustrée à la Figure 4-9. Nous supposons que le centre de répartition de véhicules d'urgence est contacté immédiatement pour répondre à la situation.

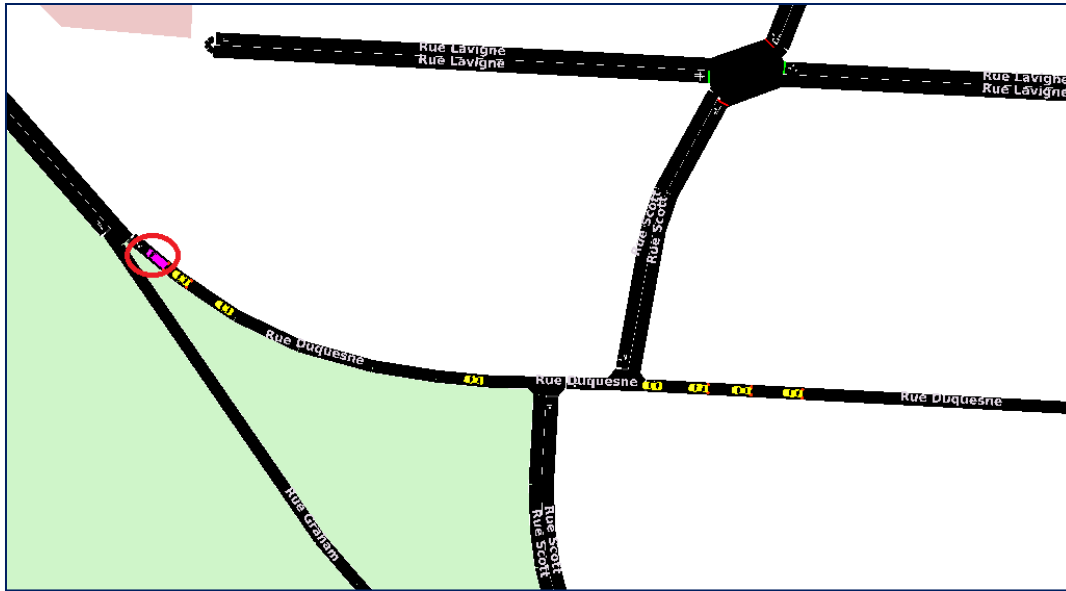


Figure 4-9 Véhicule d'urgence en panne à mi-chemin (prise de SUMO)

3.2.3. Description du déroulement du scénario

Cette situation est un peu problématique puisque dans la réalité la panne n'est rapportée qu'après un délai « assez important » (comparée à la durée totale du parcours). Pour tester l'efficacité de notre système, nous supposons que la panne est rapportée rapidement et que, dans le cas réel, le premier véhicule libre au dépôt (le lot de stationnement de l'hôpital) est envoyé en remplacement vers la destination du véhicule d'urgence EV2 qui est en panne.

Ainsi, comme EV0 est initialement libre dans le lot de stationnement de l'hôpital, nous supposons que c'est celui-ci qui est réaffecté à l'appel pour le cas réel. EV0 aura donc la même route que celui qui est en panne, puisqu'ils partent du même point de départ (l'hôpital).

La situation diffère avec notre SAGVU puisque nous proposons un traitement adapté à cette situation. Le véhicule d'urgence choisi ne sera pas le premier dans le lot de stationnement de l'hôpital, mais celui qui permet un délai minimum en prenant en compte à la fois la situation actuelle de la flotte, la criticité des appels d'urgence en cours de traitement et l'état actuel de la

circulation. En fait, le processus de réaffectation se base sur les critères de réaffectation cités dans la section portant sur les hypothèses de simulation.

À la réception de la notification de la panne, que nous avons amorcée lors de la simulation, l'AC station est alerté. Ce dernier sollicite la mise-à-jour de l'état de tous les véhicules de sa flotte et appelle le module AC voisinage afin de déterminer les véhicules candidats pour le remplacement. Puis, il appelle le module AC affectation pour la minimisation des réaffectations et la communication de la mise à jour de la route au véhicule choisi.

Trois candidats potentiels ont été identifiés par le module AC voisinage, à savoir EV0, EV3 et EV5. Ces derniers présentent des temps de parcours acceptables compte tenu de la localisation de l'appel d'urgence, bien que leurs états soient différents. Les Figures 4-10 et 4-11 illustrent les routes potentielles des véhicules EV3 et EV5 vers le site d'appel d'urgence.

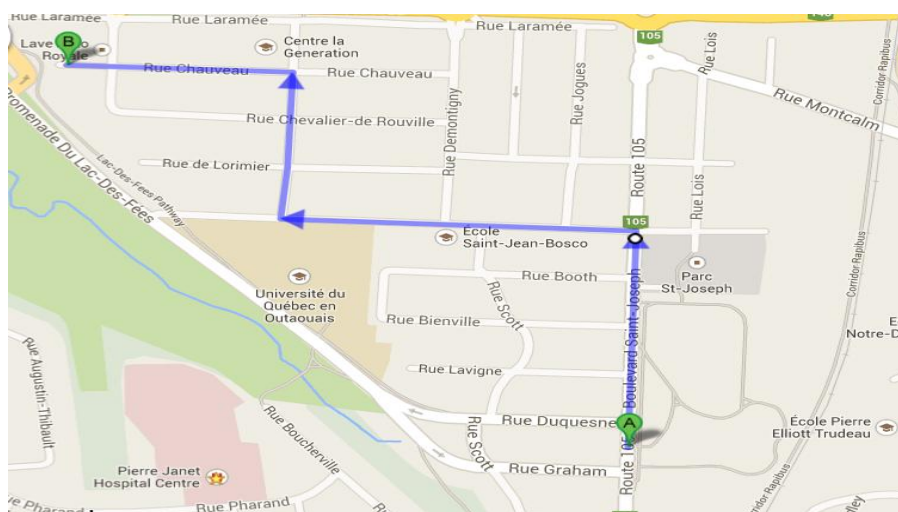


Figure 4-10 Route potentielle du véhicule EV3 vers le site d'appel d'urgence

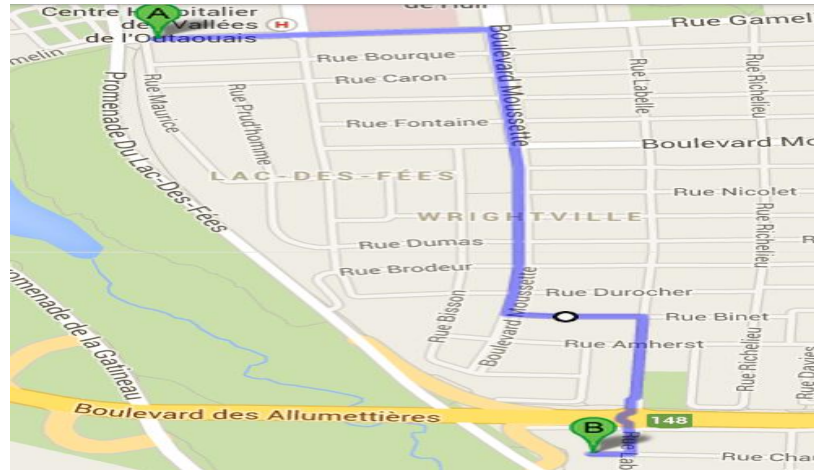


Figure 4-11 Route potentielle du véhicule EV5 vers le site d'appel d'urgence

Le Tableau 8 résume les caractéristiques des différentes routes et les états des véhicules candidats.

En se basant sur les hypothèses de réaffectation, le véhicule EV3 ne sera pas choisi par le module AC affectation, bien que ce dernier présente le meilleur temps de parcours, étant donné que le gain en temps de parcours par rapport à un véhicule candidat libre est inférieur à τ . Ainsi, EV3 ne sera pas réaffecté et EV5 sera choisi à la place pour le remplacement du véhicule en panne.

Tableau 8- Caractéristiques des routes des véhicules candidats

Label d'EV	Etat	Temps de parcours prévu (s)	Distance parcourue (m)	Sévérité de l'appel en cours
EV3	En route vers un site d'urgence	190	1741.1	2
EV5	Libre	232	2447.68	n/a
EV0	Libre	262	2368.45	n/a

Pour bien comprendre le déroulement du scénario, nous décrivons à la Figure 4-12 les occurrences des événements durant la période de simulation.

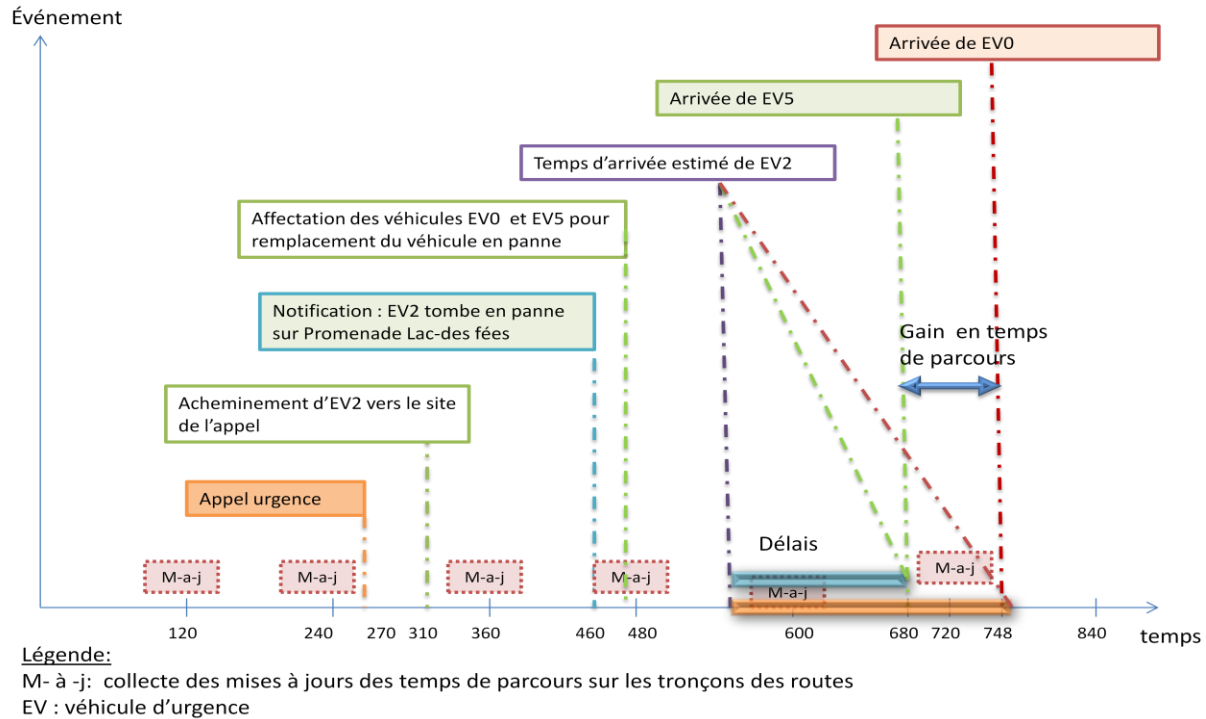


Figure 4-12 Déroulement du scénario 2

La nouvelle route du véhicule EV5, telle que déterminée par notre SAGVU à partir de sa position courante, est présentée à la Figure 4-10. Les détails de la route sont les suivants:

- Localisation actuelle d'EV: Rue Gamelin
- Position actuelle d'EV: 732 m
- Temps de parcours écoulé (parcours par EV2): 150s
- Nouveau temps de parcours prévu: 232s
- Nouveau temps de parcours total : 382s
- Délai prévu : 125s

3.2.4. Résultats

Il est clair dès la phase de planification de la réaffectation que le choix du véhicule EV0 pour remplacer le véhicule en panne n'est pas optimal vu un temps de parcours plus important et une distance plus longue. Le Tableau 9 montre la différence entre les temps de parcours prévu et réel ainsi que la différence entre les délais prévu et réel pour les différents véhicules candidats, en comparant leur temps d'arrivée réel et estimé avec le temps d'arrivée planifié au départ pour EV2.

Tableau 9- Résultats de simulation du scénario 2

labels	Temps de parcours statique (s)	Temps de parcours prévu (s)	Temps de parcours réel (s)	Distance parcourue (m)	Délai(s) prévu (s)	Délai(s) réel (s)
EV2	223	257	150/257	1305	0	infini
EV0	225	262	358	2368.45	155	251
EV5	226	232	300	2447.68	125	193
EV3	166	190	203	1741.1	83	96

Délai prévu = temps de parcours prévu – temps restant du temps de parcours original

Délai réel = temps de parcours réel - temps restant du temps de parcours original

Le délai estimé pour le véhicule EV2 à son départ pour le site d'urgence était de 0s en se basant sur les approximations de l'état réel de la circulation à ce moment. Toutefois, après l'occurrence de la panne, le délai devient infini puisqu'il s'arrête 150s après son départ et n'arrivera jamais à destination.

L'affectation du véhicule EV5 permet de réduire le délai et ce dernier arrive à destination avant EV0. Par contre, l'affectation du véhicule EV5 cause un délai un peu plus important que si EV3 avait été réaffecté. Mais, en réalité, le choix du véhicule EV5 à la place du véhicule EV3 permet d'épargner un délai supplémentaire au site desservi par EV3, ce qui aurait créé un délai total plus important pour l'ensemble du système. Ainsi, la déstabilisation du système de gestion par des réaffectations simultanées s'en trouve minimisée.

L'usage des temps de parcours dynamiques a permis de mieux approximer les temps de déplacement sur les routes si on les compare au temps de parcours statiques. Ces derniers représentent les temps de déplacement utilisant les vitesses maximales allouées sur les routes qu'on considère dans la plupart des travaux dans la littérature.

Encore une fois, la différence entre les temps de parcours réels et prévus est due en grande partie aux feux de signalisation. De plus « Netconverter » a ajouté à certaines intersections des feux de signalisations pour définir les priorités sur les routes (bien que ces feux

n'existent pas réellement), ce qui a introduit de nouveaux délais. La suppression de ces feux aurait nécessité le recours à un logiciel payant (« NetEditor »).

3.3. Analyse des résultats

Suite à cette étude expérimentale, il apparaît clairement qu'une supervision des routes des véhicules d'urgence est indispensable pour garantir une qualité de service adéquate, surtout dans le cas des ambulances où les délais encourus sur la route ont des répercussions négatives sur les chances de survie des patients, particulièrement ceux de haute sévérité. La gestion adaptative proposée permet une supervision continue des parcours des véhicules, une réaction plus rapide aux événements et, de ce fait, une réduction des délais et une limitation des dommages.

En effet, si on regarde le premier scénario étudié, sans le ré-routage proposé par le SAGVU, le véhicule d'urgence reste coincé dans une congestion pour une durée non négligeable (comparée au temps de parcours total du véhicule), et ceci même si on envisage l'utilisation de sa sirène afin d'obtenir la priorité. De fait, certains accidents sur les routes peuvent entraîner la fermeture complète de la voie de passage, comme pour les gros camions de livraison que nous avons simulés. Ces cas nécessitent des remorques spéciales et résultent en un délai important sur la route.

Par ailleurs, l'usage de zone d'action dynamique dans ce même scénario a permis de localiser les véhicules affectés par l'événement imprévu et de fournir des solutions appropriées pour chacun d'eux sans avoir à vérifier l'état de toute la flotte de véhicules. On se concentre ainsi sur les changements vraiment nécessaires, épargnant un temps de calcul superflu.

Le deuxième scénario a mis en évidence l'importance de la transmission continue d'informations entre le centre de répartition de véhicules d'urgence (SAGVU) et la flotte des véhicules d'urgence. Une notification à temps de pannes ou des blocages de véhicules en route permet de réagir plus rapidement pour trouver un véhicule remplaçant ainsi minimiser les délais résultants. D'autre part, l'introduction de pénalités dans les temps de parcours prévus des véhicules candidats déjà en route vers un site d'urgence et l'usage d'un seuil τ pour la réaffectation permettent de réduire les réaffectations en boucle et maintenir une certaine stabilité de la solution.

Chaque contexte étant unique, nous avons montré comment une surveillance continue et une adaptation dynamique appropriée permettent de raffiner la connaissance de l'environnement en continu et d'en réduire les délais.

De façon générale, l'optimisation locale via la limitation des modifications aux éléments qui le nécessitent vraiment et la considération du prochain lien sur la route d'un véhicule lors des calculs permettent de respecter le caractère temps réel de la gestion. En effet, les véhicules circulent de façon continue sur le réseau et faute de traitement rapide et de prise en compte de l'emplacement prévu des véhicules à la fin des traitements, les solutions fournies pourraient s'avérer non applicables.

Ces scénarios étudiés ont mis en évidence la pertinence de notre approche de résolution proposée pour la gestion des véhicules d'urgence dans un environnement réel caractérisé par son dynamisme et incertitude. Notre approche contextuelle basée sur une architecture configurable a permis une souplesse de traitement et une adaptabilité efficace aux différents événements, comparée aux traitements rencontrés dans la littérature qui ne présentent qu'une solution unique et indépendante du contexte.

L'échange perpétuel de mises à jour d'informations entre les véhicules de la flotte et le centre de gestion a permis une vision plus globale et complète de tous les éléments de la prise de décision. Ainsi, nous avons été capables d'identifier le(s) véhicule(s) le(s) plus approprié(s) à chaque contexte de manière à maximiser l'utilisation de la flotte de véhicules. Toutefois, nous avons supposé un médium de communication parfait entre les véhicules de la flotte et le centre de gestion et nous n'avons pas ignoré les problèmes du réseau envisagé, qui sort du cadre de notre étude, et qui peuvent avoir des effets non négligeables sur la prise de décision.

De plus, la considération du contexte VANet dans notre étude a permis une bonne modélisation du système de répartition dynamique des véhicules d'urgence en considérant des communications entre les composantes du réseau de transport et le centre de répartition des véhicules. Toutefois, l'outil de simulation qu'on a utilisé (SUMO) présente certaines limites et ne présente pas de fonctionnalités spécifiques pour les véhicules d'urgence de façon que l'on n'a pas été capable de reproduire leurs cheminements avec haute-fidélité. L'ajout de ces

fonctionnalités à SUMO ou l'emploi d'un outil payant comme Vissim ou QualNet nous permettra de fournir de meilleurs résultats.

Les scénarios de notre étude expérimentale ont couvert toutes les possibilités des événements présentés dans notre base des règles (Tableau 3). Bien que cette dernière ne soit pas exhaustive, d'autres types d'événements et de scénarios pourraient facilement y être rajoutés en se basant sur la notion d'agents complexes de traitements utilisée dans notre architecture. Toutefois, nous avons réussi à identifier les événements les plus déterminants du réseau routier, à notre connaissance, et ayant un impact sur les véhicules d'urgence pour lesquels nous avons défini les plans de traitements appropriés.

Finalement, ces scénarios étudiés ont mis en évidence l'atteinte de l'objectif principal du travail en termes de réduction des délais des véhicules d'urgence tout en respectant le critère de stabilité du système de gestion défini par la minimisation des réaffectations en chaîne ainsi que la validation de la majorité des objectifs secondaires de notre étude.

Conclusion, Contributions et Travaux futurs

1. Conclusion

Les systèmes de transport intelligent, utilisant des technologies variées, contribuent à la révolution du système de transport et à l'amélioration de la performance des infrastructures routières. Le déploiement des nouvelles technologies de l'information permet d'augmenter la quantité et la qualité des informations et la rapidité avec laquelle celles-ci sont transmises ainsi d'aborder les pénuries des systèmes de transport avec des chances de succès plus raisonnables.

La supervision du trafic routier, la surveillance des routes des véhicules d'urgence ainsi que la gestion adaptative dynamique de ces derniers sont très importantes pour la réduction des délais et le maintien des temps de réponse requis. Conséquemment, la minimisation des répercussions négatives des incidents sur les vies humaines et les biens matériels ainsi que l'amélioration de la sécurité de ceux qui n'en sont pas impliqués.

Tout au long de cette étude, nous avons cherché à concevoir une nouvelle approche d'affectation des véhicules d'urgence qui remédie aux lacunes des approches existantes spécifiquement en termes de gestion des incertitudes de l'environnement. Les effets de ces derniers sont ignorés dans la majorité des approches existantes et leurs gestions sont délaissées aux expertises des conducteurs des véhicules d'urgence, quoiqu'ils présentent des répercussions non négligeables sur le temps de réponse.

Pour ce faire, nous avons cherché à modéliser le système d'affectation dynamique des véhicules dans le cadre des STI afin de profiter de la quantité d'informations qui pourrait être échangée rapidement tout en supposant une transmission parfaite d'informations. De plus, nous avons essayé d'identifier les événements les plus déterminants du réseau routier et ayant un impact sur les véhicules d'urgence auquel nous avons à définir des traitements appropriés. Nous avons supposé que les événements imprévus sur la route n'ont de répercussions que sur les temps de réponses des véhicules en service et leurs impacts sont négligeables sur les véhicules sur site ou en patrouille. Aussi, il a été impératif d'identifier une approche de ré-optimisation adaptée aux différents contextes, vu la diversité des événements qu'un système de gestion peut avoir à traiter, et qui permet de maximiser l'utilisation de la flotte de véhicules d'urgence.

Pour répondre à nos objectifs, nous avons défini une nouvelle formulation du problème d'affectation des véhicules d'urgence dans le cadre des STI. Nous avons proposé une approche contextuelle à base de scénarios pour l'affectation dynamique des véhicules d'urgence à la place des méthodes classiques basées sur une minimisation d'une formulation mathématique théorique du problème qui propose une solution unique indépendante du contexte.

Nous avons défini une base de règles à partir des principaux événements qui peuvent être rencontrés, pour lesquels nous avons spécifié des algorithmes de traitement appropriés. Toutefois, de nouveaux algorithmes pourraient être facilement ajoutés si d'autres événements s'avèrent pertinents en se basant sur la notion d'agents complexes de traitements utilisée.

Notre approche contextuelle est fondée sur une architecture configurable qui nous permet une souplesse de traitement et une adaptabilité efficace aux différents contextes ce qui acquiert une certaine flexibilité à notre formulation du problème comparée aux méthodes classiques.

De plus la quantité d'informations échangées sur l'état de la flotte de véhicules et l'état instantané du trafic routier dans le contexte ITS, permet une vision plus globale et complète de tous les éléments de la prise de décision ainsi il était possible de maximiser l'utilisation de la flotte de véhicules.

Pour valider l'efficacité de notre approche, nous avons effectué une étude empirique via des scénarios concrets et réels et mis en évidence les gains en termes de réduction de temps de parcours et de délai que notre approche de résolution permet d'atteindre.

Nous avons démontré qu'un système de gestion qui surveille en continu l'état des routes des véhicules de sa flotte et propose des adaptations rapides en fonction des changements dans l'environnement peut effectivement produire une performance supérieure comparée aux traitements rencontrés dans la littérature où une ré-optimisation de la solution ne se fait que lors de l'arrivée d'un nouvel appel ou à des intervalles fixes de 5 à 10 mn et où aucune gestion des imprévus n'est envisagée. Le scénario de ré-routage de véhicule en situation de congestion temporaire dans sa route planifiée en est un exemple.

Chaque contexte étant unique, nous avons montré comment une surveillance continue et une adaptation dynamique appropriée permettent de raffiner la connaissance de l'environnement en continu et d'en réduire les délais.

2. Travaux futurs

Dans ce travail, nous avons simulé une situation routière pendant un certain intervalle de temps et supposé un état particulier, suffisamment diversifié, d'une flotte de véhicules d'urgence pour tester notre approche de gestion. Il serait intéressant maintenant de simuler notre approche de gestion avec des données réelles, soit une configuration réelle d'une flotte de véhicules d'urgence et un état réel de la circulation routière afin de valider nos résultats.

D'autre part, SUMO présente des limites quant aux simulations des véhicules d'urgence puisqu'il n'inclut pas de fonctionnalités spécifiques pour ces derniers. Les véhicules d'urgence sont simulés comme tous les autres véhicules et ils ne peuvent donc obtenir priorité sur les autres véhicules ou traverser aux feux rouges. Il n'est donc pas possible de reproduire leur cheminement réel avec haute fidélité. Il serait donc intéressant de reprendre les scénarios testés avec un simulateur plus sophistiqué tel que Vissim ou étendre SUMO en ajoutant ces fonctionnalités.

Par ailleurs, les adaptations proposées par notre système de gestion se basent sur des informations de trafic recueillies à des intervalles de temps réguliers. Jumeler un modèle de prévision de temps de parcours à court terme permettrait de mieux estimer les effets des congestions temporaires sur la circulation routière. Il serait ainsi intéressant d'ajouter une capacité de prévision des temps de parcours, peut-être via un apprentissage en ligne, pour mieux estimer l'évolution des situations routières et éviter certaines réaffectations inutiles.

Finalement, notre approche de résolution s'apprête au caractère évolutif. En effet, si on ajoute un module d'apprentissage en ligne des algorithmes de traitement pour d'autres événements, qu'on n'a pas considéré dans cette étude, peuvent être facilement déduit.

Références

- [1] Feng, L. U., Yingying, D., & Nianbo, Z. (2009, August). A practical route guidance approach based on historical and real-time traffic effects. In *Geoinformatics, 2009 17th International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- [2] NFPA 1710, Standard for the Organization and Deployment of Fire Suppression Operations, Emergency Medical Operations, and Special Operations to the Public by Career Fire Departments, 2001 Edition, 1 Batterymarch Park, PO Box 9101, Quincy, MA.
- [3] Traffic Incident Management Handbook, 2000.
http://ntl.bts.gov/lib/jpodocs/rept_mis/13286.pdf
- [4] Teng, H. H. (2004). Research Report No. UVACTS-15-0-62 August, (2004).
<http://cts.virginia.edu/docs/UVACTS-15-0-62.pdf>
- [5] Freeway Management and Operations Handbook, chapter 10,
http://ops.fhwa.dot.gov/freewaymgmt/publications/frwy_mgmt_handbook/chapter10.htm
- [6] Boyles, S., & Waller, S. T. (2007). A stochastic delay prediction model for real-time incident management. *ITE Journal*, 77(11), pp. 18-24.
- [7] Morales, J. M. (1986). Analytical procedures for estimating freeway traffic congestion. *Public Roads*, 50(HS-040 182).
- [8] Smith, K., & Smith, B. (2002). Forecasting the clearance time of freeway accidents. Publication STL-2001-012. Center for Transportation Studies, University of Virginia.
- [9] Haghani, A., Tian, Q., & Hu, H. (2004). Simulation model for real-time emergency vehicle dispatching and routing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1882(1), pp. 176-183.
- [10] Kwon, J., Mauch, M., & Varaiya, P. (2006). Components of congestion: Delay from incidents, special events, lane closures, weather, potential ramp metering gain, and excess demand. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1959(1), pp. 84-91.
- [11] Hallenbeck, M. E., Ishimaru, J. M., Nee, J., & Rickman, T. D. (2003). Measurement of Recurring versus Non-Recurring Congestion: Technical Report. Washington State Department of Transportation.
- [12] Bremmer, D., Cotton, K. C., Cotey, D., Prestrud, C. E., & Westby, G. (2004). Measuring congestion: Learning from operational data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1895(1), pp. 188-196.

- [13] Parkany, E., & Xie, C. (2005). A complete review of incident detection algorithms & their deployment: What works and what doesn't (No. NETCR 37, NETC 00-7).
- [14] Haghani, A. & Yang, S. (2007). Real Time Emergency Response Fleet Deployment: Concepts, Systems, Simulation & Case Studies, in *Dynamic Fleet Management Concepts, Systems, Algorithms & Case Studies*; edited by Vasileios Zeimpekis, Christos D. Tarantilis, George M. Gialis, and Ioannis Minis, Springer Science Business Media, pp. 133-162.
- [15] Al-Deek, H., Garib, A., & Radwan, A. E. (1995). New method for estimating freeway incident congestion. *Transportation Research Record*, (1494), pp. 30-39.
- [16] Madanat, S., & Feroze, A. (1997). Prediction models for incident clearance time for Borman Expressway (No. FHWA/IN/JHRP-96/10).
- [17] Lee, J. Y., Chung, J. H., & Son, B. (2010). Incident clearance time analysis for Korean freeways using structural equation model. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 8, pp. 1878-1891.
- [18] Ozbay, K., & Kachroo, P. (1999). *Incident Management in Intelligent Transportation Systems*. Artech House, Boston.
- [19] Han-Tao, Z., Jun-Qiang, L., & Guo-Sheng, M. (2009, April). Research on Highway Emergency Vehicle Dispatching Model. In *Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2009. ICMTMA'09. International Conference on* (Vol. 2, pp. 296-299). IEEE.
- [20] Xu, Q., Mak, T., Ko, J., & Sengupta, R. (2004, October). Vehicle-to-vehicle safety messaging in DSRC. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks* (pp. 19-28). ACM.
- [21] Huisken, G., (2003). *Soft-Computing Techniques Applied to Short-term Traffic Flow Forecasting, Systems Analysis Modeling Simulation*, Vol.43-2, pp. 165-173.
- [22] Talbot, V. (2011) *Mécanismes décisionnels préservant la performance des systèmes distribués adaptatifs, mémoire de maîtrise*, UQO.
- [23] "Connected Vehicle Infrastructure Plan", Report of Parsons Brinckerhoff and the Center for Automotive Research, Michigan Department of Transportation. October 2012. Available: http://www.michigan.gov/documents/mdot/10-09-2012_Connected_Vehicle_Infostructure_Plan_401340_7.pdf
- [24] Biswas, S., Tatchikou, R., & Dion, F. (2006). Vehicle-to-vehicle wireless communication protocols for enhancing highway traffic safety. *Communications Magazine*, IEEE, 44(1), 74-82.
- [25] Fisher, M. L., & Jaikumar, R. (1981). A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*, 11(2), pp. 109-124.

- [26] Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., & Prins, C. (2011). *Heuristique pour les Problemes de Tournées de Véhicules multi-attributs*. CIRRIELT-2011-12 www.cirreilt.ca.
- [27] Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (1987). The vehicle routing problem (Vol. 9). Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [28] Taniguchi, E., Yamada, T., & Kakimoto, Y. (2001). Probabilistic routing and scheduling of urban pickup/delivery trucks with variable travel times. In Proceedings-Japan Society of Civil Engineers (pp. 49-62).
- [29] Taniguchi, E., & Shimamoto, H. (2004). Intelligent transportation system based dynamic vehicle routing and scheduling with variable travel times. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 12(3), pp. 235-250.
- [30] Gendreau, M., & Potvin, J-Y. (1998). Dynamic vehicle routing and dispatching. pp. 115-126. Springer US.
- [31] Fisher, M. L., (1985). An Applications Oriented Guide to Lagrangian Relaxation, Interface, Vol. 15, pp. 10-21.
- [32] Toregas, C., Swain, R. ReVelle, C. & Bergman, L. (1971). The Location of Emergency Service Facilities, *Operations Research*, Vol. 19, pp. 1363-1373.
- [33] Benyahia, I. & Potvin, J.-Y. (2001). A framework for information management in dynamic dispatching," IEEE HICSS-34 (Hawaii Int. Conf. on System Science).
- [34] Larson, R. (1975), Approximating the Performance of Urban Emergency Service Systems, *Operations Research*, Vol.23, No.5, pp. 845-868.
- [35] Haghani, A., H. Hu, & Tian, Q. (2003). An Optimization Model for Real-Time Emergency Vehicle Dispatching and Routing, Proceeding CD of the 82nd annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [36] Yang, S., Hamed, M., & Haghani, A. (2005). Online dispatching and routing model for emergency vehicles with area coverage constraints. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1923(1), 1-8.
- [37] Andersson, T., & Värbrand, P. (2006). Decision support tools for ambulance dispatch and relocation. *Journal of the Operational Research Society*, 58(2), pp. 195-201.
- [38] Taniguchi, E., Thompson, R. G., & Yamada, T. (2012). Emerging Techniques for Enhancing the Practical Application of City Logistics Models. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 39, pp. 3-18.

- [39] Beaudry, A., Laporte, G., Melo, T., & Nickel, S. (2010). Dynamic transportation of patients in hospitals. *OR Spectrum*, 32(1), pp. 77-107.
- [40] Ibri, S., Nourelfath, M., & Drias, H. (2010, October). On the integration of dispatching and covering for emergency vehicles management system. In *Machine and Web Intelligence (ICMWI), 2010 International Conference on Machine and Web Intelligence (ICMWI)*. pp. 198-204.
- [41] Ibri, S., Drias, H., & Nourelfath, M. (2010). Integrated emergency vehicle dispatching and covering: A parallel Ant-tabu approach. In *8th International Conference of Modeling and Simulation (MOSIM 2010) Hammamet, Tunisia, Lavoisier, May* (pp. 10-12).
- [42] Ibri, S., Nourelfath, M., & Drias, H. (2012). A multi-agent approach for integrated emergency vehicle dispatching and covering problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(3), pp. 554-565.
- [43] Fleischmann, B., Gnutzmann, S., & Sandvoß, E. (2004). Dynamic vehicle routing based on online traffic information. *Transportation Science*, 38(4), pp.420-433.
- [44] Taniguchi, E., Yamada, T., & Tamagawa, D. (1999). Probabilistic vehicle routing and scheduling on variable travel times with dynamic traffic simulation. In *International Conference on City Logistics*, 1st, 1999, Cairns, Queensland, Australia.
- [45] Laporte, G., Louveaux, F., & Mercure, H. (1992). The vehicle routing problem with stochastic travel times. *Transportation Science*, 26(3), pp. 161-170.
- [46] Gendreau, M., Laporte, G., & Semet, F. (2001). A dynamic model and parallel tabu search heuristic for real-time ambulance relocation. *Parallel Computing*, 27(12), pp. 1641-1653.
- [47] Goldberg, J., & Paz, L. (1991). Locating Emergency Vehicle Bases when Service Time Depends on Call Location, *Transportation Science*, Vol. 25, No.4, pp. 264-280.
- [48] Ichoua, S., Gendreau, M., & Potvin, J.-Y. (2007). Planned route optimization for real-time vehicle routing. In *Dynamic Fleet Management*. pp. 1-18. Springer US.
- [49] Moretti Branchini, R., Amaral Armentano, V., & Løkketangen, A. (2009). Adaptive granular local search heuristic for a dynamic vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 36(11), pp. 2955-2968.
- [50] Lorini, S., Potvin, J. Y., & Zufferey, N. (2011). Online vehicle routing and scheduling with dynamic travel times. *Computers & Operations Research*, 38(7), pp. 1086-1090.
- [51] Greenwood, D., Dannegger, C., Dorer, K., & Calisti, M. (2009). Dynamic Dispatching and Transport Optimization—Real-World Experience with Perspectives on Pervasive Technology

- Integration. In *System Sciences, 2009. HICSS '09. 42nd Hawaii International Conference* (pp. 1-9).
- [52] Okhrin, I., & Richter, K. (2008). The Real-Time Vehicle Routing Problem. In *Operations Research Proceedings 2007* (pp. 141-146). Springer Berlin Heidelberg.
- [53] Güner, A. R., Murat, A., & Chinnam, R. B. (2012). Dynamic routing under recurrent and non-recurrent congestion using real-time ITS. *Information Computers & Operations Research*, 39(2), pp. 358-373.
- [54] Lopez, B., Innocenti, B., Busquets, D. (2008). A multi-agent system for coordinating ambulances for emergency medical services. *IEEE Intel. Syst.* 5, pp. 50–57.
- [55] Giaglis, G. M., Minis, I., Tatarakis, A., & Zeimpekis, V. (2004). Minimizing logistics risk through real-time vehicle routing and mobile technologies: Research to date and future trends. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 34(9), pp. 749-764.
- [56] Giaglis, G. M., Minis, I., Tatarakis, A., & Zeimpekis, V. (2004). Minimizing logistics risk through real-time vehicle routing and mobile technologies: Research to date and future trends. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 34(9), pp. 749-764.
- [57] Wenning, B. L., Görg, C., Timm-Giel, A., Schönberger, J., & Kopfer, H. (2007). Investigations on object-centered routing in dynamic environments: Algorithmic framework and initial numerical results. In *Proceedings of the 9th International Conference on Enterprise Information Systems, Madeira, Portugal* (pp. 225-230).
- [58] Nabaa, M., Zeddini, B., & Tranouez, P. (2007). Approche décentralisée pour résoudre le problème du transport à la demande. *Schedae*, prépublication n° 23, Fascicule n° 2, pp. 133-140.
- [59] Zeddini, B., Yassine, A., Temani, M., & Ghedira, K. (2008, April). An agent-oriented approach for the dynamic vehicle routing problem. In *Advanced Information Systems for Enterprises, 2008. IWAISE'08. International Workshop on Advanced Information Systems for Enterprises* (pp. 70-76). IEEE.
- [60] Zeddini, B., Yassine, A., Temani, M., & Ghédira, K. (2008, June). Collective intelligence for demand-responsive transportation systems: a self organization model. In *Proceedings of the 8th international conference on new technologies in distributed systems*. pp. 39. ACM.
- [61] Zargayouna, M. (2005) Une représentation spatio-temporelle de l'environnement pour le transport à la demande, Atelier : Représentation sur le temps et l'espace (RTE 2005), Plate-forme AFIA 2005, Nice, France, 62 p.
- [62] Solnon, C. (2010). Résolution de problèmes combinatoires et optimisation par colonies de fourmis. *Notes de cours*. URL <http://www710.univ-lyon1.fr/~csolnon/>. pp. 14, 16.

- [63] Branke, J. (2001). Evolutionary approaches to dynamic optimization problems-updated survey. In GECCO Workshop on evolutionary algorithms for dynamic optimization problems (pp. 27-30).
- [64] Ando, N., & Taniguchi, E. (2006). Travel time reliability in vehicle routing and scheduling with time windows. *Networks and Spatial Economics*, 6(3-4), pp. 293-311.
- [65] Yang, S. (2006) Integrated management of emergency vehicle fleet. Dissertation submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
- [66] Montemanni, R., Gambardella, L. M., Rizzoli, A. E., & Donati, A. V. (2005). Ant colony system for a dynamic vehicle routing problem. *Journal of Combinatorial Optimization*, 10(4), pp. 327-343.
- [67] Pillac, V., Guéret, C., & Medaglia, A. (2012). A fast re-optimization approach for dynamic vehicle routing. hal-00739782, version .1 <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00739782>
- [68] Zhao, X., Goncalves, G., & Dupas, R. (2009). On-line genetic algorithm for the dynamic vehicle routing problem with real-time time-dependent travel times, *IEEE Computers & Industrial Engineering*. pp. 1052 – 1057.
- [69] Li C. & Yang, S. (2009). A Clustering Particle Swarm Optimizer for Dynamic Optimization. CEC'09 Proceedings of the Eleventh Conference on Congress on Evolutionary Computation IEEE Press Piscataway, NJ, USA ©2009, pp. 439 – 446.
- [70] Lou, S. Z., & Shi, Z. K. (2005, August). An effective tabu search algorithm for large-scale and real-time vehicle dispatching problems. In *Machine Learning and Cybernetics, 2005. Proceedings of 2005 International Conference on* (Vol. 6, pp. 3579-3584). IEEE.
- [71] Hall, R. (1986). The Fastest Path through a Network with Random Time-Dependent Travel Times. *Transportation Science*, Vol. 20, No. 3, pp. 182-188.
- [72] Dean, B. C. (2004). Shortest paths in FIFO time-dependent networks: Theory and algorithms. Rapport technique, Massachusetts Institute of Technology.
- [73] Behrisch, M. Bieker, L. Erdmann, J. & Krajzewicz, D. (2011) SUMO -Simulation of Urban MObility: An Overview In: SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation, 2011.
- [74] Chabini, I. (1998). Discrete dynamic shortest path problems in transportation applications: Complexity and algorithms with optimal run time. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1645(1), pp. 170-175.

- [75] Zhao, L. & Ohshima, T. (2008). A* algorithm for the time-dependent shortest path problem. In WAAC08: The 11th Japan-Korea Joint Workshop on Algorithms and Computation.
- [76] Goldberg, A. V., & Harrelson, C. (2005, January). Computing the shortest path: A search meets graph theory. In *Proceedings of the sixteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms* (pp. 156-165). Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [77] Jigang, W., Han, P., Jagadeesh, G. R., & Srikanthan, T. (2010, April). Practical algorithm for shortest path on large networks with time-dependent edge-length. In *Computer Engineering and Technology (ICCET), 2010 2nd International Conference on* (Vol. 2, pp. V2-57). IEEE.
- [78] Larsen, A., Madsen, O. B., & Solomon, M. M. (2007). Classification of dynamic vehicle routing systems. In *Dynamic Fleet Management* (pp. 19-40). Springer US.
- [79] Gillett, B. E., & Miller, L. R. (1974). A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem. *Operations Research*, 22(2), 340-349.
- [80] Lorini, S., Potvin, J.-Y., & Zufferey, N. (2011). Online vehicle routing and scheduling with dynamic travel times. *Computers & Operations Research*, 38(7), pp. 1086-1090
- [81] Huang, B., & Pan, X. (2007). GIS coupled with traffic simulation and optimization for incident response. *Computers, environment and urban systems*, 31(2), pp. 116-132.
- [82] Costeseque, G. (2011). Analyse et modélisation du trafic routier: Passage du microscopique au macroscopique. *Mémoire de Maitrise à l'Université de Lyon-2011*.
http://www.fundacioabertis.org/rcs_pub/premi_abertis_costeseque.pdf
- [83] Open Street Map. <http://www.openstreetmap.org/>
- [84] TraCI4Matlab. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/44805-traci4matlab>
- [85] TraCI4J. <https://github.com/egueli/TraCI4J>
- [86] Ferman, M. A., Blumenfeld, D. E., & Dai, X. (2005, March). An analytical evaluation of a real-time traffic information system using probe vehicles. In *Intelligent Transportation Systems* (Vol. 9, No. 1, pp. 23-34). Taylor & Francis Group.
- [87] Westerman, M., Litjens, R., & Linnartz, J. P. (1996). Integration of probe vehicle and induction loop data: Estimation of travel times and automatic incident detection.
- [88] Tao, S., Manolopoulos, V., Rodriguez, S., & Rusu, A. (2012). Real-Time Urban Traffic State Estimation with A-GPS Mobile Phones as Probes. *Journal of Transportation Technologies*, 2, 22.

- [89] Chen, Y., Gao, L., Li, Z. P., & Liu, Y. C. (2007, September). A new method for urban traffic state estimation based on vehicle tracking algorithm. In *Intelligent Transportation Systems Conference, 2007. ITSC 2007. IEEE* (pp. 1097-1101). IEEE.
- [90] Yang, S., Hamed, M., & Haghani, A. (2005). Online dispatching and routing model for emergency vehicles with area coverage constraints. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1923(1), 1-8.

Annexe 1: Voisinage dynamique

- **Entrée:**
 - Emplacement de l'appel d'urgence « E »
 - Priorité « P » de l'appel d'urgence
 - Liste des mises à jour des véhicules
 - « Temps de parcours maximum « T » pour la priorité « P »
- **Sortie:** Liste des véhicules voisins candidats triés selon leur temps d'arrivée.

Algorithme :

$H = \{\}$ * liste de véhicules représentant des candidats potentiels*\

$K = \{\}$ * liste des véhicules voisins retenus*\

1. Pour chaque $v \in V$: * pour chaque véhicule de la flotte*\

Si état(v) = Libre

Alors ADD [v , H]; * $H := H \cup \{v\}$ *\

Si (état(v) = En route vers un site d'urgence & priorité (v) $\leq$ P)

Alors ADD [v , H];

Fin Pour

2. Calculer le temps de déplacement des véhicules candidats ($v \in H$) au site de l'appel d'urgence.

Pour chaque $v \in H$:

$T(v)$ = Plus court chemin de Emplacement (v) à E;

Si (état (v) = est en route vers un site d'urgence & Priorité (v) $<$ P)

Alors $T(v) = T(v) + \beta$ * Ajouter une pénalité au temps de parcours;

Plus la priorité est haute et plus la pénalité β est

importante. *\

Si $T(v) \leq T$

Alors $ADD[v, K]; \quad \backslash * K := K \cup \{v\} * \backslash$

Fin Pour

3. Trier K par ordre croissant des temps de parcours

4. Retourner la liste K .

Annexe 2 : Algorithmes du plus court chemin

Le pseudo-code de l'algorithme de Jigang *et al.* [77] est présenté dans ce qui suit.

- **Entrée:**
 - Plus court chemin statique « L » entre deux nœuds a et b
 - Grade r du sous-réseau à générer
- **Sortie:** un DSP approximatif de a à b;

Algorithme D_LS (L, a, b, r);

/* Trouver un DSP approximatif du sommet a au sommet b, par recherche locale dans le sous-réseau G' de grade r du réseau G . */

Début :

1. $G' := L$; /* Initialisation du sous-réseau G' de grade r */
2. Pour chaque nœud $v_i \in L$ faire /* étendre G' */
 - 2.1 Mettre en place $V_i^{(r)}$; /* L'ensemble des voisins de grade r du nœud v_i */

avec $V_i^{(r)} = \{u \mid \text{dist}(u, v_i) \leq r\}$ /* la distance du voisin u au nœud $v_i \leq r$ */
 - 2.2 Pour chaque nœud $u \in V_i^{(r)}$ faire

Si u n'est pas dans le sous-réseau G'

Alors Ajouter u et ses nœuds adjacents dans G' ;
- Fin Pour;
3. Exécuter D_DA dans le sous-réseau G' pour calculer un plus court chemin L'
4. Retourner L' comme DSP approximatif entre a et b dans le réseau;

Fin.

Algorithme D_DA (a, b, t, L);

Début

1. $H := \{a\};$ /*Initialisation de l'arbre du plus court chemin H */
2. Pour chaque nœud $u \in V$ faire /* Initialisation des valeurs du plus court chemin */
 - Si $(a, u) \in E$ alors $\text{dist}(a, u, t) := w(a, u, t)$
 - Sinon $\text{dist}(a, u, t) := +\infty;$
3. Tant que $b \notin H$ Faire

Début

- 3.1 Extraire le nœud u tel que

$$\text{dist}(a, u, t) \leq \text{dist}(a, v, t) \text{ pour tout } v \in V ;$$

- 3.2 $H := H \cup \{u\}$ et $V := V - \{u\};$

- 3.3 Pour chaque voisin v de u faire

$$\text{Si } \text{dist}(a, v, t) > \text{dist}(a, u, t) + w(u, v, \text{dist}(a, u, t))$$

$$\text{alors } \text{dist}(a, v, t) := \text{dist}(a, u, t) + w(u, v, \text{dist}(a, u, t));$$

Fin Tant que

Fin.

Par commodité de calcul et pour réduire l'espace mémoire nécessaire, nous avons modifié un peu le pseudo-code de l'algorithme de Jigang *et al.* [77] de façon à ce que l'exécution de l'algorithme dynamique de Dijkstra et la vérification du voisinage des nœuds sur le plus court chemin statique soient faites simultanément et non pas séquentiellement. En effet, il faut parfois calculer le plus court chemin entre plusieurs nœuds sources et destinations ce qui entraîne un usage important de mémoire pour stocker les différents sous-réseaux à traiter. Le pseudo-code de l'algorithme modifié est présenté ci-dessous avec les mêmes entrées que celles de l'algorithme de Jigang *et al.* [77].

Dans le même esprit, puisqu'un véhicule d'urgence peut faire face à des changements imprévisibles sur sa route qui demandent le calcul rapide d'un nouveau chemin, l'idée de Jigang

et al. [77] sera exploitée à nouveau, mais en utilisant le chemin courant utilisé par le véhicule d'urgence comme solution initiale à l'algorithme dynamique. On cherchera ensuite à affiner ce chemin en utilisant les informations temps réel. On utilisera également le nœud le plus proche du véhicule comme nœud source s lors des calculs. Ainsi, on pourra évaluer rapidement toute déviation de la route courante.

Algorithme modifié D_LS (L, a, b, r);

```

1.  Pour chaque  $u \in G$       \ * pour chaque nœud  $u$  du réseau  $G$  * \
     $d[u] = \infty$ ;      \ *initialisation de la distance du nœud  $u$  à la destination  $b$  * \
    Parent [ $u$ ] = NIL;    \ *initialisation des arbres des nœuds vers la destination  $b$  * \
  Fin Pour

   $d[a] = 0$ ;      \ *initialisation de la distance du nœud source  $a$  à la destination  $b$  * \
   $H = \{a\}$ ;      \ *initialisation des nœuds candidats vers la destination  $b$  * \

2.  Tant que  $H \neq \emptyset$  et  $b \notin H$ :
     $u = \text{Extraire\_Min}(H)$ ;      \ * Extraire le nœud de  $H$  avec la distance minimale vers la destination * \
    Étiquette ( $u$ ) := Examiné;
    Pour chaque nœud  $v$  adjacent à  $u$  :
      Si outOfRange( $v$ ), alors continuer;
      Sinon
        Si  $d[v] > d[u] + w[u, v]$ , alors
          {  $d[v] = d[u] + w[u, v]$ ;    \ * mettre à jour la distance de  $v$  * \
            Parent [ $v$ ] =  $u$ ;          \ * mettre à jour l'arborescence du nœud */
            Ajouter [ $v, H$ ];          \ *  $H := H \cup \{v\}$  * \
          }
    Fin Tant que

Procédure outOfRange(grade  $r$ , nœud  $v$ ): \ * évaluation de voisinage de grade  $r$  * \
  // Degré  $r$  du sous-réseau à générer;

```

Annexe 2

// v est un sommet en cours de vérification;

$\text{dist}(v, L) = \min_{u \in L} \{ \text{dist}(u, v) \}$;

Si $\text{dist}(u, v_i) > r$

Alors retourner vrai;

Sinon

Retourner faux;

Fin.