

Modèle multi-agents d'aide à la décision
pour la gestion des services préhospitaliers d'urgence

Par

Adil CHENNANOUI

THÈSE PAR ARTICLE PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DU DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

RECTIFICATIF

MONTREAL, LE 30 NOVEMBRE 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Adil Chennaoui, 2018

RECTIFICATIF À LA THÈSE

MODÈLE MULTI-AGENTS D'AIDE À LA DÉCISION POUR LA GESTION DES SERVICES HOSPITALIERS D'URGENCE

Thèse déposée initialement le 25 juin 2015

À la demande de l'École de technologie supérieure, un premier rectificatif a été apporté à cette thèse afin d'identifier un emprunt de texte fait sans l'autorisation de son auteur initial M. Gildas Morvan. Comme confirmé par l'École de technologie supérieure, ce premier rectificatif n'a toutefois pas d'incidence sur la validité de cette thèse ni sur ses résultats.

Le point 1.3.2 tel que décrit dans les pages 51 à 57 de la thèse initiale de M. Adil Chennaoui a été caviardé et le texte amendé doit se lire tel que présenté ci-dessous.

3.1.1 Notions et définitions

Cette section de la revue de littérature est basée principalement sur le travail de (Morvan, 2009).

3.1.1.1 L'agent

Selon Morvan (2009), un agent peut être défini comme une « entité agissante ». Le terme Agent ou Agent computationnel, dans les sciences de l'information, est utilisé pour désigner un système informatique, logiciel et/ou matériel, autonome et capable d'agir dans environnement, de le percevoir, de le représenter et d'interagir avec d'autres agents. Les actions d'un agent ont un but sans en être nécessairement.

Le comportement d'un agent est défini par l'ensemble de ses actions et réactions observées dans une situation donnée. En revanche, l'architecture interne d'un agent est constituée de l'ensemble de mécanismes/modules internes lui permettant de sélectionner et de réaliser un comportement. C'est une chaîne de composants logiciels assurant un rôle bien défini. Les modules d'un agent peuvent être exécutés séquentiellement ou simultanément et distingue au minimum trois modules (Morvan, 2009) :

IV

- Un module de perception : son rôle est d'acquérir des données provenant de son environnement.
- Un module d'action : son rôle est de changer localement son environnement.
- Un module de prise de décision : son rôle est de choisir et de planifier les actions à effectuer dans son environnement.

Vu sa complexité, le module de prise de décision est considéré comme le plus difficile à réaliser et plusieurs architectures sont apparues pour le modéliser. Classiquement, on peut comparer deux types d'architectures selon la manière dont l'agent se représente son environnement. Si l'agent dispose d'une représentation symbolique de son environnement, il s'agit alors d'agent cognitif, si non d'agent réactif dans le cas contraire. Ces termes sont employés afin de désigner, d'une part des agents indépendamment intelligents qui possèdent des croyances sur leur environnement. Ils peuvent planifier un ensemble d'actions pour réaliser leurs objectifs. D'autre part, des agents avec des mécanismes de prise de décision réactifs aux stimuli qui constituent une perception de leur environnement.

L'utilisation de la seule distinction cognitif et réactif est trop réductrice et il est judicieux d'ajouter une autre dimension liée aux objectifs et aux buts des agents (Ferber 1995). On parle alors :

- De conduite téléonomique, si les objectifs sont définis dans les agents eux-mêmes.
- Et de conduite réflexe, si les objectifs sont présents dans leur environnement.

Ce rapport entre la relation du monde et la conduite permet de distinguer quatre types d'agents présentés dans le Tableau 4.6.

Tableau 4.1 Les différents types d'agents (Ferber, 1995)

Relation au monde Conduites	Agents cognitifs	Agents réactifs
Téléonomiques	Agents intentionnels	Agents pulsionnels
Réflexes	Agents « modules »	Agents tropiques

À titre d'exemple, détaillons les agents réactifs. Si l'agent réagit seulement à des stimuli externes, qui proviennent de son environnement, il s'agit d'agent tropique et si la réaction de l'agent est limitée aux stimuli internes et externes, il s'agit alors d'agent pulsionnel. Donc, l'état de l'agent peut être considérée comme une source de motivation pour celui-ci (Morvan, 2009). Ferber (1995) considère que ces classifications sont purement conceptuelles tant qu'il est possible de créer des agents hybrides, incluant à la fois certaines caractéristiques des agents cognitifs, réactifs et téléonomiques.

3.1.1.2 L'environnement

Dans les systèmes multi-agents, la notion d'environnement est primordiale et fondamentale (Morvan, 2009). Généralement, la conception de cet environnement devance la conception des agents. En effet, la nature de l'environnement a beaucoup d'influence sur l'architecture des agents, précisément au niveau des effecteurs et des percepteurs. Norvig et Russel (2009) ont proposé des clés de classification d'environnements (Morvan, 2009):

- Déterminisme : Une action réalisée dans un contexte donné, d'un environnement déterministe, ne produira qu'un seul et même effet.
- Continuité : Si toutes les actions et perceptions possibles sont finies (Morvan, 2009), on parle d'un environnement discret, continu sinon.
- Accessibilité : il s'agit d'un environnement accessible, si l'agent est capable d'acquérir toutes les informations concernant l'état de son environnement.
- Dynamisme : un environnement dynamique change indépendamment des agents. Pourtant, un environnement statique donné ne peut pas changer sans les actions menées par des agents.

Les environnements inaccessibles, non-déterministes, dynamiques et continus constituent la catégorie la plus complexe et la plus générales des environnements. Ils sont qualifiés d'environnements ouverts. L'architecture d'un agent sera d'autant plus complexe que l'environnement dans lequel il agit est lui-même complexe.

Selon Morvan (2009), un environnement et dans le contexte des simulations multi-agents est souvent défini comme un espace métrique. Il définit une notion de distance entre tous les

composants de cet ensemble. De plus, l'environnement est généralement discret et toute portion de cet environnement considérée comme homogène est appelée alors cellule. L'exemple de cet environnement le plus illustratif est représenté sous forme d'une grille à deux dimensions, divisée en sections carrées et chaque section dispose souvent de quatre (voisinage de Von Neumann) ou huit (voisinage de Moore) voisins (Morvan, 2009).

3.1.1.3 Communication entre agents

Une des caractéristiques importantes des agents et leur capacité à communiquer. La communication représente la forme la plus courante d'interaction dans les systèmes multi-agents. Un acte de communication (volontaire ou non) est défini comme étant l'envoi d'un message d'un émetteur à un ou plusieurs récepteurs. Les récepteurs disposent d'un canal pour acheminer le message à sa destination et d'un langage commun pour qu'il soit compris. Si le message est adressé à un destinataire unique, il s'agit d'une communication point à point et de diffusion dans le cas contraire. Généralement, les acte de communications font partie d'une conversation et ne sont pas des actes isolés. Un message est souvent interprété selon son contexte et selon les échanges menés précédemment. Chaque émetteur/récepteur dispose d'un protocole de communication et tout acte de communication peut être volontaire ou accidentel, voulu ou subis par l'émetteur/acteur.

Selon Morvan (2009), la communication directe est la méthode de communication la plus simple où le message est envoyé directement au récepteur. Ce message peut être stocké sous une forme et une dans une structure donnée. Il s'agit d'un message symbolique selon Ferber (1995). Dans ce mode de communication, la diffusion et la communication point à point sont bien autorisées et les agents récepteurs doivent être bien identifiés par l'émetteur. Ces fonctionnalités sont généralement offertes par les plates-formes multi-agents.

Morvan (2009) définit un tableau d'affichage (appelé aussi tableau noir) comme une structure de données accessible par tous les agents. L'ensemble des agents sont capables d'y mettre, de consulter, de modifier et de supprimer des messages. La diffusion des messages est effectuée sous forme d'annonces dans ce mode de communication. Le mode de communication indirect utilisant l'environnement comme medium est appelé stigmergie. Elle

a été utilisée dans des algorithmes d'optimisation où les individus communiquent en changeant localement leur environnement dans l'espace et dans le temps. Dans le contexte des SMA, un agent peut communiquer via la diffusion de signaux et en laissant des marques dans son environnement. Un signal constitue une caractéristique principale d'un environnement qui se répande selon sa propre loi.

Une marque est définie comme étant un signal avec une durée de vie limitée et qui ne se propage pas. À titre d'exemple, il est envisageable d'associer à chaque cellule, dans un environnement discret, des variables d'environnement. Il y a deux paramètres qui définissent le comportement de ces variables d'environnement : le coefficient de diffusion qui correspond à la proportion de la valeur de la variable d'environnement qui sera répartie d'une manière équitable entre les voisins de la cellule au pas d'exécution suivant et un coefficient d'évaporation qui correspond à la proportion de la valeur de la variable d'environnement, après diffusion, qui sera perdue par la cellule au pas d'exécution suivant (Morvan, 2009).

Les agents doivent avoir des effecteurs qui leur permettent de manipuler des variables d'environnement. Il faut mentionner que l'intégration des notions comme la saturation peut changer la définition d'une variable d'environnement. Les méthodes de communication directe et par tableau d'affichage sont convenables à la conduite de conversations puisqu'elles supportent des structures de message plus complexes (Morvan 2009). Dans ce contexte que des langages fondés sur la théorie des actes de langage comme KQML (*Knowledge Query and Manipulation Language*) ou ACL (*Agent Communication Language*) ont été développés. Le Tableau 4.7 présente les différents modes de communication tels que décrits par Ferber (1995).

Tableau 4.2 Modes de communication (Ferber, 1995)

Type de message	Mode de communication	Acheminement	Intentionnalité
Message symbolique point à point	Point à point	Direct	Généralement intentionnel
Message	Diffusion	Direct	Généralement

symbolique diffusé			intentionnel
Annonce	Diffusion / Point à point	Tableau d'affichage	Généralement intentionnel
Signal	Diffusion	Propagation	Incident

3.1.1.4 Le système multi-agents

À ce niveau, on peut déterminer ce qu'est un SMA. Ainsi, les principales caractéristiques d'un SMA sont définies comme suit (Morvan, 2009) :

- Un groupe (E) d'entités placées dans un environnement (V).
- Un groupe (A) d'agents avec $(A) \subseteq (E)$.
- Un système d'action sous forme de percepteurs et d'effecteurs qui permettent aux agents d'intervenir et d'agir dans leur environnement.
- Un système d'interaction et de communication entre agents.
- Et enfin, une organisation qui permet de structurer l'ensemble des agents.

Références bibliographiques

Morvan, 2009 : « Approche multi-agents d'un système d'aide à la décision en environnement dynamique et incertain. Application à l'entomologie médico-légale ». Gildas Morvan, Université d'Artois, 2009.

Un second rectificatif a également été apporté à cette thèse afin d'identifier un emprunt de texte fait sans l'autorisation de l'auteur initial M. Amani Daknou. Comme confirmé par l'École de technologie supérieure, ce deuxième rectificatif n'a pas non plus d'incidence sur la validité de cette thèse ni sur ses résultats.

Tableau 4.3 Domaines d'application des SMA (tiré de Daknou, 2011)

Domaine d'application	Détails
Écosystèmes et modèles	Les modèles individus centrés ou orientés individus sont des simulations basées sur les résultats globaux d'interactions locales entre éléments d'une

individus centrés	population. Ces éléments représentent à titre d'exemple des animaux dans un écosystème, des voitures dans la circulation, des individus dans une foule, ou des personnages indépendants dans un jeu. Dans un modèle orienté-individu, on peut continuellement suivre les caractéristiques de chaque individu. Dans ces modèles, un agent (individu) représente un élément du monde réel : un être-humain, un objet, un animal, <i>etc.</i> Plusieurs applications de simulation utilisent des SMA basés sur un modèle orienté-individu. Des plateformes telles que SWARM leur sont parfois complètement dédiées.
Systèmes complexes	Dans ce type de système, les techniques de modélisation classiques sont difficilement utilisables. En effet, les paramètres de ces systèmes sont très nombreux ou contradictoires pour pouvoir être pris en compte. Quelquefois, il est difficile de connaître tous les facteurs qui interviennent lors de la modélisation. L'approche multi-agents offre la possibilité de recourir à une modélisation locale. Grâce aux règles d'émergence compris dans les SMA, cette modélisation permet d'avoir un système ayant les caractéristiques voulues. Il s'agit principalement de tous les systèmes qui permettent la simulation d'écosystèmes. La simulation d'une fourmilière (Drogoul, 1993) est un exemple typique.
SAD (systèmes d'aide à la décision) et SMA	Ces systèmes se trouvent dans plusieurs domaines d'activité. L'objectif principal de ces systèmes est de mettre à la disposition du personnel les éléments primordiaux afin de faciliter la prise de décision. Il consiste alors à extraire et à traiter convenablement des données et des informations depuis leurs sources. Un traitement convenable des données est essentiel pour une bonne prise décision multicritères. Les SMA se proposent comme solution appropriée afin de traiter des données provenant de sources différentes et sous des formats différents. Il faut alors avoir la capacité d'établir une corrélation entre les différentes variables définies afin de les présenter à l'utilisateur. Une approche à base d'agents peut atteindre cet objectif, en appliquant les règles et concepts de négociation et de coopération, qui constitue un champ d'utilisation des systèmes multi-agents.
Les approches SMA dans le secteur de santé	Ces systèmes dans le domaine hospitalier peuvent améliorer la qualité des soins, des traitements offerts aux patients et la performance du personnel. Ils permettent d'augmenter rigoureusement le respect de la réglementation et de la

	protection du personnel soignant des risques de procédés. Ils peuvent réduire les charges financières et le temps de traitement concernant les prestations de service informatique. Les caractéristiques des agents intelligents (telles que la proactivité, l'autonomie et les capacités sociales) et l'architecture des SMA (traitement de l'information distribuée, communication, coordination, négociation) constituent un champ de recherche très prometteur afin de trouver des solutions efficaces à différentes problématiques dans le domaine de la santé.
--	--

Le Tableau 1.8 Domaines d'application des SMA tel que décrit dans les pages 59 à 61 de la thèse initiale de M. Adil Chennaoui a été caviardé et le texte amendé doit se lire tel que présenté ci-dessous.

Références bibliographiques

Daknou, 2011 : « Architecture distribuée à base d'agents pour optimiser la prise en charge des patients dans les services d'urgence en milieu hospitalier ». Thèse de doctorat, Amani Daknou, École Centrale de Lille, 2011.

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

PAR
Adil CHENNAOUI

MODÈLE MULTI-AGENTS D'AIDE À LA DÉCISION POUR LA GESTION DES
SERVICES PRÉHOSPITALIERS D'URGENCE

MONTREAL, LE 25 JUIN 2015

©Tous droits réservés, Adil Chennaoui, 2015

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Marc Paquet, directeur de thèse
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Roger Champagne, président du jury
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

M. Mickaël Gardoni, membre du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Jean-Marc Frayret, examinateur externe
Département de mathématiques et de génie industriel à Polytechnique de Montréal

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 28 MAI 2015

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

La présente thèse est constituée d'une introduction générale, d'un premier chapitre présentant une revue de la littérature, de trois (3) chapitres où sont insérés des articles dont je suis le premier auteur, d'une conclusion générale et de quatre annexes discutant d'aspects pratiques et des résultats liés aux développements des outils mathématiques et informatiques utilisés.

Le premier article, inséré au Chapitre 2, s'intitule « *Integrated and global approach (IGAP) based on multi-agent systems for the management of prehospital emergency services* ». J'ai œuvré comme chercheur principal au développement des concepts et à la rédaction de l'article. Cet article a fait l'objet d'une soumission à la revue *Computers & Industrial Engineering*, chez l'éditeur Elsevier. Une version préliminaire courte de cet article a été présentée à Rabat (Maroc) aux Journées Doctorales en Systèmes d'Information, Réseaux et Télécommunications (JDSIRT'13).

Le second article, inséré au Chapitre 3, s'intitule « *Scheduling Model for Prehospital Emergency Services* ». J'ai œuvré comme chercheur principal au développement des concepts, à l'écriture du modèle et à la réalisation des expérimentations. Cet article a fait l'objet d'une soumission à l'*European Journal of Operational Research*, chez l'éditeur Elsevier. De plus, la version préliminaire courte de cet article a été présentée à Bruxelles (Belgique) à *The 3rd International Conference of Algorithmic Decision Theory* (ADT 2013).

Le troisième article, inséré au Chapitre 4, s'intitule « *Multi-Agent Decision-Making Support Model for the Management of Prehospital Emergency Services* ». J'ai œuvré comme chercheur principal au développement des concepts, à l'écriture du modèle, à la réalisation des expérimentations et à la rédaction de l'article. Cet article a fait l'objet d'une publication dans *International Journal of Machine Learning and Computing*, chez l'éditeur IACSIT. La version préliminaire courte de cet article a été présentée à Toronto à *The 6th International Conference on Machine Learning and Computing* (ICMLC 2014).

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans cette thèse a été réalisé avec le support de mon directeur, le professeur Marc Paquet. Son aide précieuse, son support financier et ses conseils judicieux sont inestimables. Je tiens donc à le remercier sincèrement.

Mes remerciements vont également au personnel du service des statistiques et recherche opérationnelle de la Corporation d'Urgences-santé de Québec avec qui j'ai eu le privilège de travailler. Un merci particulier à M. Louis Trahan, directeur général adjoint et M. Jacques Gauthier, directeur du département des technologies de l'information chez la Corporation d'Urgences-santé de Québec pour leur appui et leur confiance.

Je souhaite également remercier les membres du Comité de Jury, soit le professeur, examinateur externe Jean-Marc Frayret de l'école Polytechnique de Montréal, le professeur Roger Champagne, directeur de jury et le professeur Mikaël Gardoni de l'École de Technologie Supérieure.

Ma reconnaissance va également à mes chers parents, mes sœurs et mon frère pour leurs encouragements. Des remerciements tous spéciaux à mon épouse Madiha pour sa patience, son aide, son support et ses encouragements, et sans qui ce travail n'aurait jamais vu le jour. Une pensée toute particulière va enfin à ma fille Yasmine.

MODÈLE MULTI-AGENTS D'AIDE À LA DÉCISION POUR LA GESTION DES SERVICES PRÉHOSPITALIERS D'URGENCE

Adil CHENNAOUI

RÉSUMÉ

La nécessité de mieux comprendre et maîtriser la complexité des systèmes d'information exige le développement de nouvelles méthodes de modélisation et de résolution de problèmes. Ce travail de recherche s'intéresse à la conception et la modélisation d'un système d'aide à la décision dans lequel le savoir et les compétences de l'expert permettent d'analyser et de proposer de nouveaux modèles multi-agents. Le développement d'un tel modèle relève un certain nombre de difficultés de conception, liés notamment à l'efficience et l'efficacité du processus de calcul et de résolution du problème, auxquels on apporte des éléments de solution.

Beaucoup de systèmes complexes se caractérisent par des dynamiques non linéaires, désordonnées et aléatoires, en résumé compliquées dans le sens où leur assimilation demande du temps et du talent. Les méthodes mathématiques classiques (équations différentielles, modèles probabilistes, *etc.*) peuvent s'avérer inappropriées pour modéliser de tels systèmes dans lesquels l'interaction occupe un rôle très important. La modélisation à base d'agents réactifs est l'une des techniques de modélisation microscopique les plus répandues. Pourquoi choisir une modélisation orientée agent plutôt qu'un autre méta-modèle de modélisation? Premièrement, le modèle agent est très riche. Il aide ainsi le concepteur à schématiser facilement des processus qualitatifs et quantitatifs et permet d'interagir des entités hétérogènes aux architectures diverses. Pourtant, la raison principale est souvent liée à la vocation de modélisation : bien appréhender la relation entre actions/comportements individuels et action/comportement collectif.

Ce travail est mené principalement dans un cadre applicatif lié au problème de planification et de gestion des services préhospitaliers d'urgence (SPU). En effet, on trouve un ensemble de recherches qui traitent le sujet de la gestion et de la planification des SPU. Chaque travail de recherche traite une problématique bien spécifique de ce domaine, soit la confection des horaires des ambulanciers, soit la gestion de la demande en services préhospitaliers, ou la gestion des véhicules/ambulances, *etc.*

Cette thèse s'intéresse à la problématique de planification des services préhospitaliers d'urgence afin de mieux répondre à la demande de service et par conséquent diminuer le temps-réponse des ambulanciers. Elle adopte une approche de résolution globale et intégrée. Elle vise la proposition d'un modèle sous forme de différentes composantes d'aide à la décision. Elle intègre des techniques d'optimisation touchant à la fois la planification des horaires, la gestion des remplacements, la gestion de la flotte de véhicules, la gestion de la capacité des dépôts, la couverture de la demande et la gestion des événements spéciaux. Le modèle proposé est basé sur une architecture multi-agents et permet de répondre aux contraintes et aux aléas survenus lors de la planification des SPU.

Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse est articulé autour de trois articles suivants :

- « *Integrated and global approach (IGAP) based on multi-agent systems for the management of prehospital emergency services* », soumis à *Computers & Industrial Engineering* de Elsevier. Cet article présente une introduction aux systèmes multi-agents appliqués aux SPU et propose une nouvelle approche globale et intégrée pour sa résolution appelée IGAP.
- « *Scheduling Model for Prehospital Emergency Services* », soumis à l'*European Journal of Operational Research* de Elsevier. Cet article traite le problème de confection d'horaires des techniciens ambulanciers. Notre contribution réside dans la proposition d'un modèle mathématique appelé « *set covering* » qui résout un problème de couverture intégré dans un nouveau système suffisamment flexible de confection d'horaires.
- « *Multi-Agent Decision-Making Support Model for the Management of Prehospital Emergency Services* », publié dans *International Journal of Machine Learning and Computing*, de IACSIT. Cet article porte sur le thème de la modélisation et de l'aide à la décision dans le cadre des systèmes complexes dont on propose une architecture à base d'agents d'aide à la décision dédiée à la gestion des services préhospitaliers d'urgence.

Mots clés : Planification, système multi-agents, optimisation, services préhospitaliers d'urgence, programmation linéaire, couverture par ensembles.

MULTI-AGENTS DECISION-MAKING SUPPORT MODEL FOR THE MANAGEMENT OF PREHOSPITAL EMERGENCY SERVICES

Adil CHENNAOUI

ABSTRACT

The need for a better understanding and good control of the growing complexity of information systems requires the development of new methods of modeling and problem-solving. In this research study, we are interested in the design and modeling of a decision support system in which the knowledge and skills of the expert enables the analysis and proposing of new multi-agent models. The development of such a model identifies a number of design challenges, linked in particular to the efficiency and effectiveness of the calculation process of the solution.

Many complex systems are characterized by non-linear dynamics, both disordered and random; in summary, complicated in the sense that their assimilation requires time and talent. Traditional mathematical methods (differential equations, probability models, etc.) may be inappropriate for the modeling of such systems, in which interaction plays a very important role. Modeling based reactive agents is one of the most prevalent microscopic modeling techniques. Why choose an agent-oriented modeling rather than another modeling meta-model? First, the agent model is very rich. It helps to easily schematize qualitative and quantitative processes and allows for interacting heterogeneous entities in various architectures. However, the main reason is often related to the modeling vocation: to fully understand the relationship between an individual and a collective action/behavior.

This work is undertaken primarily in an application context related to the problem of the planning and management of prehospital emergency services (PES). Indeed, there is a series of research efforts that address the topic of the management and planning of PES. Each research work addresses a very specific problem in the field, such as scheduling paramedics, managing demand, or the management of vehicles/ambulances, etc.

This thesis focuses on the planning problem of PES to reduce the response time of paramedics. It adopts a global and integrated resolution approach. It proposes a model in the form of various components of decision support. It incorporates optimization technologies that involve paramedics scheduling, managing staff replacements, managing vehicle fleets, the management of deposits capacity, coverage of demand, and management of special events. The proposed model is based on a multi-agent architecture and can meet the constraints and unforeseen events encountered in the planning of PES.

This thesis is structured around the following three papers:

- "Integrated and global approach (IGAP) based on multi-agent systems for the management of prehospital emergency services", submitted to Computers & Industrial Engineering of Elsevier. This paper presents an overview of multi-agent

systems applied to prehospital emergency services and proposes a new global and integrated approach for its resolution called IGAP.

- "Scheduling System for Prehospital Emergency Services", submitted to the European Journal of Operational Research of Elsevier. This article addresses the problem of paramedics scheduling. Our contribution is the proposal of a mathematical model that solves a coverage problem integrated in a new system of scheduling that is sufficiently flexible.
- "Multi-Agent Decision-Making Support Model for the Management of Prehospital Emergency Services", published in the International Journal of Machine Learning and Computing of IACSIT. This article focuses on the topic of modeling and decision support in the context of complex systems and proposes architecture based agents for the planning and management of prehospital emergency services.

Keywords: Planning, multi-agent system, optimization, prehospital emergency services, linear programming, set covering.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	9
1.1 Introduction aux services préhospitaliers d'urgence.....	9
1.1.1 Organisation des services préhospitaliers d'urgence	10
1.1.2 La Corporation d'Urgences-santé.....	11
1.1.2.1 L'environnement	12
1.1.2.2 Statistiques de service.....	14
1.1.2.3 Situation financière	15
1.1.2.4 Contraintes de gestion.....	16
1.1.3 Demande de services.....	22
1.1.3.1 Normes de service.....	23
1.1.3.2 Estimation de la demande	24
1.2 État de l'art : la planification	28
1.2.1 Les applications de planification du personnel.....	29
1.2.1.1 Applications générales de planification du personnel	30
1.2.1.2 Sécurité et services de police	31
1.2.1.3 Transport en commun	31
1.2.1.4 Aviation commerciale.....	32
1.2.1.5 Personnel infirmier.....	34
1.2.1.6 Médecins.....	35
1.2.1.7 Ambulances et ambulanciers paramédicaux.....	38
1.2.1.8 Conclusion sur les différentes applications.....	41
1.2.2 Les différentes méthodes de résolution.....	42
1.2.2.1 La programmation par contraintes.....	42
1.2.2.2 La programmation mathématique.....	42
1.2.2.3 Méthodes de décomposition et génération de colonnes.....	44
1.2.2.4 Les heuristiques gloutonnes.....	45
1.2.2.5 Les méta-heuristiques	46
1.2.2.6 Les hyper-heuristiques	49
1.2.2.7 Les méthodes hybrides.....	49
1.3 État de l'art des systèmes multi-agents.....	49
1.3.1 Introduction aux systèmes multi-agents.....	50
1.3.2 Notions et définitions.....	51
1.3.2.1 L'agent	51
1.3.2.2 L'environnement.....	53
1.3.2.3 Communication entre agents.....	54
1.3.2.4 Le système multi-agents	56
1.3.3 Processus de développement des SMA.....	57
1.3.4 Les méthodologies SMA.....	58
1.3.5 Domaine d'application des systèmes multi-agents	59

1.4	Synthèse	71
1.5	Problématique	72
1.6	Objectifs de recherche	74
1.7	Méthodologie	75
1.8	Contributions	76
1.9	Limites	78
1.10	Conclusion	78
CHAPITRE 2	ARTICLE 1 : INTEGRATED AND GLOBAL APPROACH (IGAP) BASED ON MULTI-AGENT SYSTEMS FOR THE MANAGEMENT OF PREHOSPITAL EMERGENCY SERVICES	79
2.1	Introduction	80
2.2	Overview of multi-agent systems in the PES planning	82
2.3	IGAP for planning of prehospital emergency services	85
2.3.1	IGAP presentation	86
2.3.2	Phases of IGAP	88
2.3.2.1	Phase 1: Setting goals	89
2.3.2.2	Phase 2: Processes definition	91
2.3.2.3	Phase 3: Selection of optimization methods	93
2.3.2.4	Phase 4: Setting agents	93
2.3.2.5	Phase 5: Selection of communication modes	94
2.3.2.6	Phase 6: Integration of modules	94
2.4	Optimization methods and data processing in IGAP	97
2.4.1	Optimization methods in IGAP	99
2.4.2	Data processing in IGAP	102
2.5	Discussion	104
2.6	Conclusion	105
CHAPITRE 3	ARTICLE 2 : SCHEDULING MODEL FOR PREHOSPITAL EMERGENCY SERVICES	107
3.1	Introduction	108
3.2	Definition of Paramedics Scheduling Problem	110
3.3	Problem solving approach	112
3.3.1	The first step: database of schedules' patterns	112
3.3.2	The second step: Problem-solving model	117
3.4	Analysis of scheduling process and methodology	124
3.5	Numerical results	128
3.6	Conclusion and perspective	135
CHAPITRE 4	ARTICLE 3 : MULTI-AGENT DECISION-MAKING SUPPORT MODEL FOR THE MANAGEMENT OF PREHOSPITAL EMERGENCY SERVICES	137
4.1	Introduction	138
4.2	Prehospital emergency services	139
4.2.1	Standards of service	140
4.2.2	Logistic	141

4.2.3	Paramedics	142
4.2.4	Other constraints	142
4.3	Resolution approach.....	142
4.4	Methodology and application	148
4.5	Results.....	156
4.6	Conclusion	159
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		161
ANNEXE I	DEMANDE ESTIMÉE POUR CHAQUE JOUR DE LA SEMAINE (HIVERNALE ET MINIMALE ANNUELLE)	165
ANNEXE II	EXEMPLE DE L'ANALYSE PRÉLIMINAIRE DES PROCESSUS	169
ANNEXE III	EXEMPLE DES RÉSULTATS OBTENUS	179
ANNEXE IV	RÉSULTATS DES TESTS (MODÈLE D'OPTIMISATION)	189
ANNEXE V	RÉSULTATS DES TESTS (ARCHITECTURE MULTI-AGENT).....	203
BIBLIOGRAPHIE.....		217

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Règles issues de la convention collective	18
Tableau 1.2 Règles relatives aux contraintes logistiques	19
Tableau 1.3 Règles implicites.....	21
Tableau 1.4 Normes de performance du MSSS.....	23
Tableau 1.5 Exemples des méthodes d'optimisation dans les SPU.....	39
Tableau 1.6 Les différents types d'agents	53
Tableau 1.7 Modes de communication	56
Tableau 1.8 Domaines d'application des SMA	59
Tableau 2.1 MAS in prehospital emergency services.....	83
Tableau 2.2 Example of processes.....	91
Tableau 2.3 Goals and processes Matrix	92
Tableau 2.4 Example of optimization methods in prehospital emergency services	97
Tableau 2.5 Matrix of optimization models.....	100
Tableau 2.6 Matrix of an optimization model definition.....	100
Tableau 2.7 Grid of an objective function definition.....	101
Tableau 2.8 Matrix of parameters.....	104
Tableau 3.1 Example of cycles "10/14"	113
Tableau 3.2 Details of the cycle 11110100111101.....	113
Tableau 3.3 Example of a 12-hour working day	114
Tableau 3.4 Details of a work day with 12 working hours.....	115
Tableau 3.5 Sample of schedules patterns database (cycle: 10/14; day: 8).....	117
Tableau 3.6 Constraints of the optimization model.....	118

Tableau 3.7	Number of schedules for each test.....	129
Tableau 3.8	Test stop criteria.....	130
Tableau 3.9	Parameter list of each test	131
Tableau 3.10	Description report of schedules	134
Tableau 4.1	Example of performance standards.....	140
Tableau 4.2	Execution time of each test	157
Tableau 4.3	Distribution of schedule by type for the 3 tests	158
Tableau 4.4	Summary of the other results	159

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Présentation du territoire couvert.....13
Figure 1.2	Relation entre le temps-réponse et le nombre de véhicules en service.....24
Figure 1.3	Demande estimée pour les vendredis de 2012-2013.....27
Figure 1.4	Processus de programmation des SOO et SMA57
Figure 1.5	Classification des méthodologies multi-agents.....58
Figure 1.6	Méthodologie de recherche.....76
Figure 2.1	Areas and processes of IGAP (Short-term)87
Figure 2.2	Areas and processes of IGAP (Mid-term)87
Figure 2.3	Areas and processes of IGAP (Long-term).....88
Figure 2.4	IGAP phases.....89
Figure 2.5	Example of setting goals.....91
Figure 2.6	IGAP basic architecture95
Figure 2.7	Paramedics planning module96
Figure 2.8	Selection and validation process of the optimization method in IGAP99
Figure 2.9	General workflow of data processing in IGAP103
Figure 3.1	Process of creating schedules.....116
Figure 3.2	Global process of paramedics scheduling.....125
Figure 3.3	Required performance criteria127
Figure 3.4	Execution time of each test.....132
Figure 3.5	Comparison between offer and demand for test 1 (Saturday)132
Figure 3.6	Comparison between offer and demand for test 2 (Saturday)133
Figure 3.7	Comparison between offer and demand for test 3 (Saturday)133

Figure 3.8	Distribution of schedules for the 3 tests.....	134
Figure 3.9	Other test results	135
Figure 4.1	The relationship between the response time and the number of vehicles in service for Priority 1 calls (2011)	141
Figure 4.2	Steps for reactive decision-making in PES.....	145
Figure 4.3	Behaviour of reactive agent in a given environment	146
Figure 4.4	Multi-agent systems based on quadrants	147
Figure 4.5	O-MASE modeling process	148
Figure 4.6	Goal model.....	149
Figure 4.7	Problem solving protocol and trigger factors.....	151
Figure 4.8	Basic application architecture	152
Figure 4.9	Architecture of scheduling agent	153
Figure 4.10	Comparison between offer and demand for test 1 (Sunday).....	157
Figure 4.11	Comparison between offer and demand for test 1 (Wednesday).....	158

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACL	Agent Communication Language
ADN	Acide Désoxyribonucléique
AG	Algorithmes Génétiques
AIDA	Agency for Integration, Diffusion and Archive of Medical Information
AMI	Ambiant Intelligence
BDI	Beliefs, Desires, Intentions
BIN	Binary
BMAPI	Biomedical Multi-agent Platform for Interoperability
CCS	Centre de Communication de Santé
KSE	Knowledge Sharing Effort
DSS	Decision Support System
EU FP7	European Union (funded research) - Seventh Framework Programme
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
FT	Full Time
GIMT	Groupe d'Intervention Médicale Tactique
GUI	Graphical User Interface
HCC	Health Council of Canada (Conseil canadien de la santé)
HCL	Hôpital Charles-Lemoyne
HGJ	Hôpital Général Juif de Montréal
HMI	Human Machine Interface
IAD	Intelligence Artificielle Distribuée
IGAP	Integrated and Global Approach for PES
ISQ	Institut de la statistique du Québec
KQML	Knowledge Query and Manipulation Language
LOPO	Leave -One- Person- Out
MAO	Multi-Agent Organization
MAS	Multi-Agent System
MASE	Multi-Agent Systems Engineering
MBU	Mobility Base Unit

MMTS	Methodology and Modeling Technique for Systems of BDI agents
MRS	Magnetic Resonance Spectroscopy
MSSS	Ministère de la Santé et des Services Sociaux du Québec
OLAP	Online Analytical Processing
OLTP	Online Transactional Processing
O-MASE	Organization-based Multiagent System Engineering
OQLF	Office Québécois de la Langue Française
PES	Prehospital Emergency Services
PMR	Problème Maître Restreint
POA	Programmation Orientée Agent
POO	Programmation Orientée Objet
PT	Part Time
RFID	Radio Frequency Identification
RS	Recuit Simulé
RT	Recherche par tabous
RUP	Processus unifié
SAD	Systèmes d'Aide à la Décision
SMA	Systèmes Multi-Agents
SMS	Short Message Service
SOA	Service Oriented Architecture
SOAP	Simple Object Access Protocol
SOO	Systèmes orientés objets
SPU	Services préhospitaliers d'urgence
SQL	Structured Query Language
SSAS	Microsoft SQL Server Analysis Services
T.A	Technicien Ambulancier
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
US	Corporation d'Urgences-santé de Québec
WLAN	Wireless Local Area Network
XML	Extensible Markup Language

INTRODUCTION

Le système de santé publique au Québec connaît actuellement un déficit budgétaire étant donné la hausse de ses dépenses. Pour y remédier, les établissements de santé devront suivre une politique budgétaire rationnelle et plus rigoureuse. L'objectif étant de s'accommoder aux ressources allouées au système de santé et de s'en servir à bon escient. Ces nouvelles contraintes de productivité viennent s'ajouter à celles relatives à la qualité et à la sécurité des soins offerts aux patients (Grenier et Martin, 2013). Ce défi constitue, entre autres, un élément important parmi les changements que connaissent aujourd'hui les établissements de santé au Québec. Ces derniers doivent répondre aux nouvelles exigences des patients à l'affût du progrès scientifique et de l'évolution des pathologies. Ces établissements évoluent ainsi dans un environnement changeant et doivent faire face à une concurrence en croissance continue. Il est donc impératif qu'ils développent de nouvelles politiques managériales pour répondre à ces nouveaux enjeux.

Au cours des dernières décennies, les établissements hospitaliers ont maintes fois tenté l'adoption des méthodes de gestion inspirées du monde des entreprises, et ce, pour reproduire l'expérience gestionnaire du secteur des affaires (Montalam et Vincent, 2013; Toussaint et Berry, 2013). Le système de santé a ainsi connu de multiples changements et restructurations hospitalières. Cela a été une occasion d'amener un grand nombre de centres médicaux à réviser leurs processus opérationnels de travail et à s'investir davantage dans la modernisation de leurs infrastructures et organisations en établissant de nouvelles stratégies. Dans ce travail de recherche, nous concentrerons notre étude sur les services préhospitaliers d'urgence (SPU), qui s'inscrivent au cœur des compétences médicales. Les SPU n'échappent pas à ce contexte d'évaluation, ils sont d'ailleurs d'autant plus concernés par la qualité des services, étant donné leurs complications ayant trait à l'organisation, la planification et aux délais d'intervention. Ces défaillances sont toujours mises en évidence.

Les ambulanciers paramédicaux sont appelés à intervenir dans des situations imprévues, pouvant être difficiles, voire stressantes. Le service de ce personnel est souvent très en demande, pourtant leur nombre est fréquemment insuffisant pour répondre à la demande de

façon satisfaisante. Pendant la dernière décennie, combien de fois a-t-on au Québec ou ailleurs entendu parler de manque de personnel et de délais d'intervention trop longs?

Les services préhospitaliers d'urgence : un système complexe

Le système de SPU au Québec est relativement novice par rapport à d'autres pays ou provinces canadiennes. Ce domaine d'activité connaît des retards sur le plan du développement logistique de ses services, mais il peut, dans son cheminement actuel, s'inspirer des modèles de systèmes préhospitaliers étrangers ayant connu certaines transformations et évolutions. Les SPU sont considérés comme un système de production de soins dont le mandat principal est d'offrir aux citoyens des services préhospitaliers d'urgence adéquats, de qualité et performants dans le but de réduire les erreurs cliniques, la mortalité et la morbidité associées aux exigences de ce domaine d'activité (GC, 2014). Les constats de terrain sur sa complexité sont nombreux et quotidiens : hiérarchisation, cloisonnement, diversité des catégories d'équipes, hétérogénéité des types d'intervention (Poitras et Lapointe, 2000). Les professionnels soignants possèdent en effet une déontologie, une culture professionnelle et une organisation hiérarchique spécifique. Aux professions typiquement paramédicales se rajoute un ensemble d'autres métiers indirectement rattachés à l'activité des soins paramédicaux (mécaniciens, personnel administratif, informaticiens, *etc.*). Enfin, ce type de service se différencie des activités de production industrielle classique et constitue essentiellement une activité d'envergure, spécifique à chaque intervention. L'activité préhospitalière est souvent complexe et complique davantage les établissements qui en ont la charge. Ainsi, le facteur humain semble avoir un grand impact sur la durée, la qualité et la difficulté des activités de production. Cette complexité est accentuée par la variété de la demande et par l'interdépendance des processus de soin au niveau spatio-temporel, au niveau de l'utilisation des ressources partagées, *etc.*

Organisation des services préhospitaliers d'urgence au Québec

Les SPU au Québec offrent des services préhospitaliers et inter-hospitaliers à un ensemble de catégories de patients, de cultures hétérogènes, d'âges différents et de toutes les classes socio-professionnelles. Ces patients, qui peuvent présenter tout type de maladie, requièrent

une prestation de service bien adaptée à leurs besoins, de bonne qualité, professionnelle et offerte d'une manière optimale. Au Canada, les SPU sont organisés et coordonnés par les autorités de santé régionales, nationales, ou même municipales. Québec n'échappe pas à cette règle où ces services sont la responsabilité des agences de santé et des services sociaux régionaux, sauf pour les îles de Montréal et de Laval dont ils sont gérés par la Corporation d'Urgences-santé de Québec. Cette dernière prend « la responsabilité de planifier, d'organiser, de coordonner et d'évaluer les services de la chaîne d'intervention préhospitalière » (MSSS, 2013).

Avant les années 70, c'étaient les maisons funéraires de Québec, en extension à leurs activités principales, qui offraient le service ambulancier ; toute personne pouvait être transporteur de patients et de blessés. Cela dit, il y avait une absence quasi-totale d'organisation proprement dite des services d'urgence, à l'instar des critères de gestion devant garantir une bonne qualité des soins. Dans un tel système, appartenant totalement aux entreprises privées, la qualité des SPU alloués repose sur la bonne conscience des gestionnaires et de la rentabilité des activités. Les années 80 sont caractérisées par une forte volonté de mieux organiser ces SPU. Certains pouvoirs sont délégués aux autorités régionales par le MSSS (Ministère de la Santé et des Services Sociaux du Québec), principalement en ce qui concerne le nombre minimum d'ambulances requis, la réglementation sur le zonage, la qualification du personnel du service, le processus d'attribution des permis d'exploitation et la gestion des budgets attribués aux SPU. L'année 1987 est particulière sur le plan des constats. Plusieurs rapports d'études sont alors publiés par des experts, qui présentent un regard critique sur des éléments considérés problématiques dans ce secteur, tant de nature structurale qu'organisationnelle. En 1988, le MSSS crée la Corporation d'Urgences-santé de Québec et adopte ainsi un nouveau concept au Québec, celui des Services préhospitaliers d'urgence. Ce concept, considéré assez novateur, a pour but de mieux organiser et encadrer la gestion des services en matière d'intervention et d'interaction dans cette phase préhospitalière, et ce, depuis le déclenchement de l'événement jusqu'à la prise en charge de la personne par le centre hospitalier (MSSS, 2013).

Les SPU se sont implantés au Québec, notamment avec la création de la Corporation d'Urgences-santé dans la région de Montréal et de Laval. Cet établissement se distingue par sa nature métropolitaine dont il doit répondre aux besoins d'une grande population en matière de soins et d'interventions d'urgence, *etc.* Cette corporation est dotée d'une grande équipe d'ambulanciers (le plus important en nombre au Québec), de médecins urgentistes, d'un centre de formation continue, d'un centre d'appels muni d'un système de répartition assistée par ordinateur, *etc.* Ces avantages ont permis à la Corporation d'Urgences-santé d'enrichir son expertise sur les niveaux opérationnel, administratif, médical et clinique aidant ainsi à améliorer le système global des SPU québécois.

Pourtant, il faut mentionner qu'au Québec, les SPU ne se sont pas instaurés d'une manière intégrée dans toutes les régions. Ce constat s'explique par les priorités qu'accorde le MSSS à d'autres activités du réseau de santé au détriment de l'encadrement et de l'implantation de ces services sur tout le territoire québécois. Les agences régionales qui subissent une insuffisance contraignante des ressources matérielles et humaines, ne sont pas toutes en mesure d'implanter une chaîne d'intervention complète et intégrée. Par conséquent, elles n'ont pas pu incorporer le système proposé dans le cadre du plan « chaque minute compte » (MSSS, 1992) ni elles ont pu réaliser les objectifs définis quant à l'organisation et l'intégration de ces services. Cela a généré un état de stagnation des services et une influence négative sur la performance du réseau, tant médicale que clinique. Le tout s'est manifesté par une augmentation du temps-réponse, une absence des standards dans l'analyse de suivi concernant le taux de survie aux arrêts cardiaques et de l'état des patients suite aux interventions préhospitalières, ainsi qu'un manque d'opérations de contrôle des services offerts, *etc.* Un ensemble de solutions ont été alors proposées et déployées afin de suivre les taux de survie, et ce, par la création des centres de traumatologie et la mise en place d'un registre des traumatismes.

Plusieurs provinces canadiennes et états américains ont procédé à l'évaluation de leurs propres systèmes et à la réalisation des réformes considérables à l'échelle nationale des SPU. Dans ces endroits, comme ailleurs dans le monde, les facteurs essentiels derrière ces changements proviennent du besoin d'intégrer et de consolider ces services, de restructurer le

système pour le rendre plus accessible, de le raccommoder davantage des besoins des citoyens, mais particulièrement d'améliorer et de mettre à jour les lois s'y rattachant, et ce, en vue de définir clairement les rôles et les responsabilités de chaque acteur du système.

Il existe au Québec deux formes de gestion des services de transport ambulancier. D'une part, il y a le modèle public représenté par la Corporation d'Urgences-santé qui depuis la fin des années 80, assure et gère l'ensemble des SPU sur les îles de Montréal et de Laval (Loi sur les services de santé et les services sociaux pour les autochtones, L.R., c. S-5). D'autre part, on trouve le modèle privé dont les SPU sont fournis par des établissements privés à but lucratif. Ce secteur privé couvre les autres régions du Québec et en 2000, on comptait plusieurs entreprises proposant des SPU, mais aujourd'hui, approximativement 80 % des appels de transport ambulancier sont couverts par 20 % de ces entreprises, tandis que 20 % sont traités par 80 % d'entre-elles (MSSS, 2007).

Ces modèles représentent deux systèmes différents dont les rapports de gestion sont assez distincts :

- Dans le secteur public, cette alliance relie deux entités publiques : la Corporation d'Urgences-santé et le MSSS;
- Dans le secteur privé, ce rapport existe entre des entités publiques et les organisations privées : les régies régionales et les entreprises privées.

Définition des services préhospitaliers d'urgence

Selon l'Office québécois de la langue française, la définition de ce qui est considérée d'urgence s'avère équivoque, voire très complexe (OQLF, 2013). En effet, cette notion d'urgence est assez ambiguë ; elle paraît nettement subjective venant du patient, par contre, elle est bien définie pour les professionnels de l'urgence. Cela veut dire que l'écart est considérable entre l'urgence comprise par le patient et l'urgence concrète telle que définie par un professionnel médical urgentiste. Cet écart est relativement plus important en matière de classification d'un cas d'urgence par rapport aux autres. Par exemple, on désigne par urgence vitale toute situation où il y a un danger potentiel sur la vie d'un patient faute de disponibilité immédiate des soins (Leclercq *et al.*, 2003).

Les services préhospitaliers d'urgence est une branche cruciale de la médecine d'urgence et leur relation est stratégique : le domaine paramédical est une sous-spécialité de la médecine d'urgence (Poitras et Lapointe, 2000). Le système des SPU québécois assure un service permanent, approprié, efficient et de qualité. Son but étant de diminuer la mortalité et la morbidité des citoyens, et ce, en respectant des règles de qualité reconnues (Urgences-santé, 2014). Il est fondé sur les bases suivantes :

- L'accessibilité : Elle accorde aux citoyens un accès permanent en tout temps aux SPU quel que soit la région habitée. L'atteinte de cet objectif implique une disponibilité des ressources avec une prise en charge des particularités régionales.
- L'efficacité : Ce principe se traduit par la grande réactivité du système mis en place pour mieux répondre aux demandes des citoyens en besoin tout en réduisant au maximum son temps-réponse.
- La qualité : Cela signifie une adaptation des interventions aux besoins de la population, une adaptation aux situations d'urgence, un respect des normes et des standards du métier et une amélioration des chances de survie des patients.
- La continuité : Elle vise l'inclusion de l'ensemble des composantes de la chaîne des SPU et une meilleure planification des services avec les autres acteurs du réseau de la santé. Elle concerne aussi l'orientation des patients, d'une manière optimale, vers les établissements de soins les plus appropriés.

Dans les dernières années, il y avait plusieurs débats et publications à propos du secteur préhospitalier qui discutent essentiellement des problématiques et des difficultés liées à la confection et la planification des horaires des techniciens ambulanciers (MSSS, 2007 ; Crawford *et al.*, 2013 ; Awasthi *et al.*, 2013), à la gestion de la demande de services préhospitaliers (Morgans *et al.*, 2013), ou la gestion des véhicules/ambulances (Gendreau *et al.*, 2014). À notre connaissance, aucun article ne traite la problématique de la gestion des SPU dans tous ses aspects avec une approche de résolution globale et intégrée. Ce travail de recherche s'intéresse à la problématique de planification des services préhospitaliers d'urgence afin de mieux répondre à la demande des SPU et par conséquent diminuer le temps-réponse des techniciens ambulanciers. Elle adopte une approche de résolution globale et intégrée basée sur une architecture multi-agents.

Cette thèse est organisée de la manière suivante : Dans le premier chapitre, nous commençons par étudier les services préhospitaliers d'urgence québécois avec ses caractéristiques et ses problématiques. Cette description est fondamentale pour bien positionner le contexte de recherche. Ensuite, nous allons présenter un état de l'art sur la planification du personnel et sur les systèmes multi-agents dans le domaine de la santé. Les deuxième, troisième et quatrième chapitres présentent les articles scientifiques sur lesquels est fondée cette thèse. Ils constituent un fil conducteur cohérent par rapport aux objectifs de la recherche tant au niveau de la méthodologie que celui des résultats.

CHAPITRE 4

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre est structuré comme suit : premièrement, nous présentons l'état de l'art des services préhospitaliers d'urgence. Puis nous invoquons un état de l'art sur les problèmes de planification et d'affectation des ressources ainsi que sur les méthodes d'optimisation de ce genre de problème dans le domaine de la santé. Enfin, nous présentons une revue de la littérature des systèmes multi-agents et leur application dans le domaine hospitalier.

4.1 Introduction aux services préhospitaliers d'urgence

Les SPU constituent une composante principale du système de santé. Ils doivent répondre aux demandes de la population tout en coopérant et coordonnant leurs activités avec plusieurs organisations concernées, de près ou de loin, par la prestation de soins préhospitaliers. Dans cette perspective, les SPU doivent évoluer par l'adoption d'une stratégie systémique orientée vers des objectifs de performance. Cette performance se définit principalement par le niveau d'atteinte des objectifs visés par le système, soit (Leblanc *et al.*, 2008) :

- Une diminution contrôlée de la mortalité et de la morbidité.
- Une forte intégration de la chaîne d'intervention préhospitalière d'urgence.
- Une adaptation du service offert aux besoins de la population par la mise en place de ressources nécessaires.
- La définition d'indicateurs de performance et des normes de qualité afin d'avoir un suivi continu de la qualité du système et de son amélioration.

L'efficacité des services (Manacorda et Pietroboni, 1981), c'est-à-dire la production du service au meilleur coût possible, est obtenue par une gestion rationnelle des ressources préhospitalières, par une responsabilisation des producteurs des services et par une meilleure information aux clients. Elle vise finalement à garantir une meilleure qualité des SPU dispensés au citoyen. Au Québec, on note une augmentation constante des sommes allouées

aux dépenses des SPU (Urgences-santé, 2013b) et d'après les statistiques du MSSS (Urgences-santé, 2012), près de 120 millions dollars canadiens ont été consacrés au financement de ces services en 2012-2013. Soit, un poids considérable dans la dépense courante de santé.

4.1.1 Organisation des services préhospitaliers d'urgence

La prise en charge des citoyens en état d'urgence fait appel à différentes ressources d'institutions socio-sanitaires et des SPU, représentée par les différentes organisations d'urgences, des services administratifs, des cliniques, des équipes para-médico-techniques, *etc.* Au sein du système d'urgence se tissent des relations et des liens complexes (intra-hospitaliers, inter-hospitaliers et extrahospitaliers) qui contribuent au bon fonctionnement du réseau de santé d'amont et d'aval. D'ailleurs, cette gestion par niveaux constitue une approche préconisée dans le but d'améliorer l'efficacité du système (Daly, 2011).

La porte d'accès unique à la chaîne préhospitalière d'urgence est les services 9-1-1 qui constituent un élément essentiel de ce système. Les services 9-1-1 couvrent plus de 97 % de la population québécoise, malgré que ce taux relativement élevé, il ne représente que 35 % du territoire québécois (Denton, 2014). La rapidité d'accès aux SPU est un facteur très important pour l'efficacité et l'efficience du système. Toutefois, pour permettre à l'ensemble des acteurs de la chaîne d'intervention de réagir rapidement, les appels concernant les services préhospitaliers doivent être acheminés directement vers le centre de communication de santé (CCS), qui a la responsabilité de traiter et de répartir ces appels selon un ensemble de standards de performance. En second lieu, on trouve les premiers répondants. Ils sont des intervenants dont leur rôle consiste à offrir aux personnes secourues les soins d'urgence nécessaires selon des protocoles d'intervention clinique prévus à leur intention (Urgences-santé, 2013a).

Les services ambulanciers représentent l'entité qui procure les soins préhospitaliers d'urgence en utilisant les moyens de transport sanitaire terrestre (l'ambulance), lesquels concerne principalement les entreprises ambulancières, la Corporation d'Urgences-santé et les ambulanciers paramédicaux ; ainsi que le transport sanitaire aérien assuré par les services

aériens gouvernementaux, les hôpitaux, les professionnels médicaux, *etc.* En dernier lieu, on trouve l'établissement receveur qui constitue le dernier maillon de la chaîne d'intervention préhospitalière qui assure une prise en charge du patient. La salle d'urgence représente et ce depuis longtemps, la porte d'entrée pour les services hospitaliers dans ces établissements receveurs.

Dans la partie suivante, on donne une présentation générale de la Corporation d'Urgences-santé et on discute de la planification des SPU et des principaux éléments influençant cette planification.

4.1.2 La Corporation d'Urgences-santé

Tel que mentionné précédemment, ce travail de recherche est réalisé au sein de la Corporation d'Urgences-santé desservant les régions de Montréal et de Laval en services préhospitaliers. La définition du terme services préhospitaliers officiellement utilisée par la corporation est la suivante : « l'assistance portée dans les meilleurs délais possibles afin de prodiguer les soins préhospitaliers nécessaires et d'offrir l'accès, le cas échéant, au centre hospitalier approprié à la condition du patient tout en tenant compte de la capacité d'accueil des institutions » (Urgences-santé, 2014a). L'activité centrale de la corporation est donc le transport par ambulance. La Corporation d'Urgences-santé détient le monopole de ces transports dans les régions de Montréal et de Laval. Cette charge opérationnelle fait de la Corporation d'Urgences-santé l'une des plus importantes corporations de services préhospitaliers en Amérique du Nord.

Le monopole d'offre de service détenu sur tout le territoire combiné à la superficie du territoire et à la taille de la population desservie ont pour effets bénéfiques de fournir certaines économies d'échelle et d'éviter les conflits territoriaux. En contrepartie, la gestion devient plus difficile, aussi bien au niveau opérationnel qu'au niveau des ressources humaines. La décision de mettre en place une seule grande corporation plutôt que plusieurs petites sur un certain territoire relève d'un choix de gestion qui ne sera pas discuté ici. Toutefois, nous devons préciser que le problème présent de planification des SPU implique plus d'employés, plus de véhicules ainsi que plus de dépôts de véhicules. Ceci augmente le

nombre de variables et augmente par conséquence le niveau de difficulté du problème à résoudre.

Officiellement, la mission d'Urgences Santé est la suivante (Urgences-santé, 2014b) :

- « Offrir des services comprenant les soins préhospitaliers d'urgence, le transport par ambulance, ainsi que le transport entre les établissements de santé ».
- « Maintenir un Centre de communication santé s'appuyant sur une technologie fiable et éprouvée ainsi que sur un système médical informatisé de triage des appels permettant de traiter les cas urgents par ordre de priorité ».
- « Assurer en tout temps à l'ensemble de la population de nos territoires faisant appel à nos services une intervention appropriée, efficace et de qualité. Notre objectif étant de réduire la souffrance, la mortalité et les conséquences néfastes des conditions médicales urgentes ayant justifié l'appel aux règles et contraintes de gestion 9-1-1 de la personne en détresse, et ce, en fonction des standards de qualité reconnus ».
- « Diriger sur nos territoires la planification, l'organisation, la coordination et l'évaluation de nos services ».
- « Initier et participer à des projets reliés à la promotion, la prévention et la recherche en matière de soins et de services préhospitaliers d'urgence ».

Les sous-sections suivantes présentent les principaux éléments de la situation actuelle de la Corporation d'Urgences-santé ayant un impact sur la planification des SPU. L'environnement sera présenté en premier, en second seront présentées les statistiques de services, suivies par la situation financière et finalement par un exposé des facteurs justifiant l'intérêt de cette étude spécifiquement chez la Corporation d'Urgences-santé.

4.1.2.1 L'environnement

Le territoire couvert par la Corporation d'Urgences-santé comprend les îles de Montréal et de Laval, soit plus de 2,3 millions d'habitants sur une superficie de 744 km² (Urgences-santé, 2011). Pour couvrir tout ce territoire, la Corporation d'Urgences-santé dispose présentement de près de 200 véhicules répartis entre trois centres opérationnels. Le terme « centre opérationnel » est employé pour désigner les dépôts de véhicules. Un siège social

administratif s'ajoute à ces installations. Ce dernier abrite la grande majorité du personnel administratif, ainsi qu'un centre d'appel (CCS) et un centre de répartition.

Les trois centres opérationnels se partagent quant à eux les quelques 1000 ambulanciers ainsi que leurs superviseurs, entourés de quelques commis qui s'occupent de l'administration touchant le centre opérationnel auquel ils sont assignés. Les deux premiers centres opérationnels s'occupent de l'est et de l'ouest de l'île de Montréal, alors que le troisième, plus petit, couvre principalement le territoire de l'Île Jésus (Laval).

Le territoire couvert est divisé en 5 secteurs. Les secteurs Ouest et Centre-Nord sont couverts par le centre opérationnel Ouest, alors que les secteurs Est et Centre-Sud sont couverts par le centre opérationnel Est. Le secteur Nord est quant à lui le seul couvert par le centre opérationnel Nord.

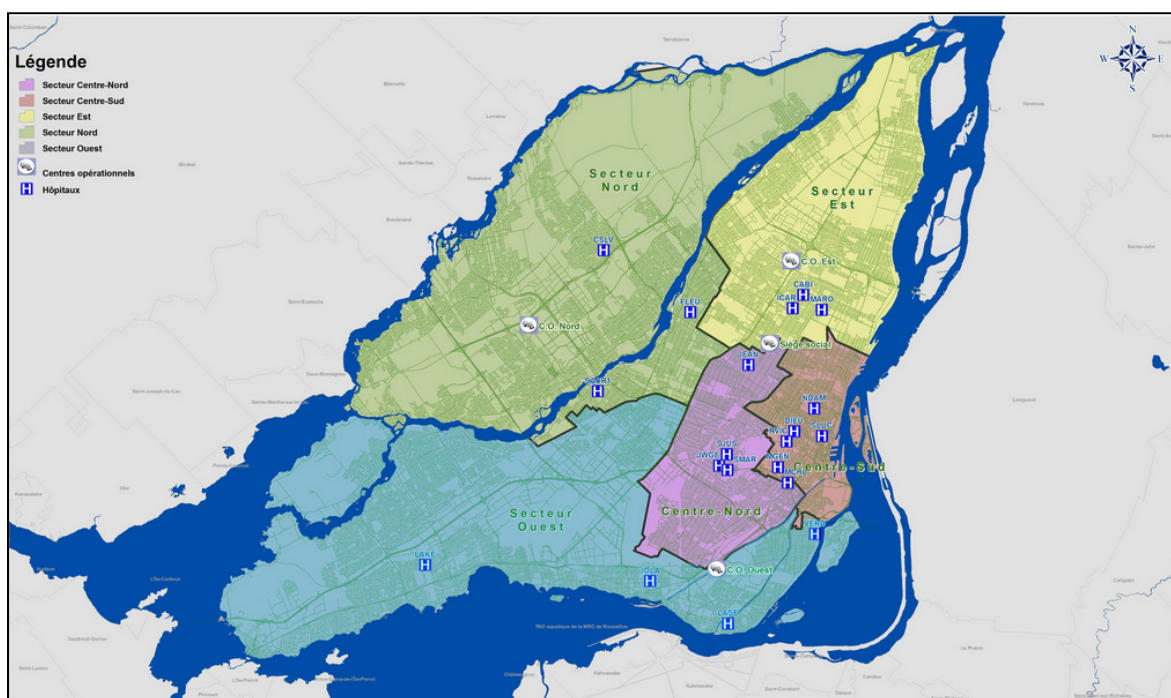


Figure 4.1 Présentation du territoire couvert

La Figure 4.1 est une présentation du territoire couvert par la Corporation d'Urgences-santé. Les différentes couleurs représentent les secteurs et les petits cercles blancs représentent les trois emplacements des centres opérationnels (dépôts de véhicules).

4.1.2.2 Statistiques de service

Les statistiques intéressantes concernent entre autres le temps de transport. On entend par temps de transport le laps de temps s'écoulant entre le moment où l'ambulance est affectée à une intervention et le moment où les ambulanciers paramédicaux sortent de l'hôpital après avoir complété les différentes formalités administratives. Durant les quatre dernières années, le temps moyen d'un transport a augmenté, passant de 73 à 79 minutes. Avec le nombre actuel moyen de 3,21 transports par quart (normalisé pour un quart de 7h45). Cette augmentation du temps de transports augmente le niveau d'occupation des ambulanciers paramédicaux de 40 000 heures par année. Cette dernière valeur correspond à près de 4 % de la totalité des heures travaillées par les techniciens ambulanciers de la Corporation.

Cette hausse du temps moyen de transport, attribuable entre autres à de nouvelles formalités administratives lors du transfert du patient à l'hôpital, diminue le nombre de transports possibles pour une équipe d'ambulanciers paramédicaux durant un quart de travail. Par le fait même, le taux d'occupation des ambulances monte sans aucune hausse relative du nombre de transport par quart. La productivité est donc en baisse. D'autres faits intéressants existent au niveau du temps réponse. Il n'est pas possible de faire de comparaisons sérieuses avec les autres corporations de services préhospitaliers au Québec puisque Montréal est la seule métropole.

Toutefois, les normes suggérées par le MSSS ne semblent pas atteintes sur tout le territoire. En pratique, le temps réponse durant plusieurs mois de 2011 est passé fréquemment au-dessus des 9 minutes en moyenne (Taillefer, 2012). Quant au 90^{ème} percentile, celui-ci se situe à environ 14 minutes pour l'ensemble du territoire couvert par la Corporation d'Urgences-santé (Taillefer, 2012a). Il est difficile de faire une évaluation précise de la qualité de ce temps-réponse puisque la Corporation d'Urgences-santé l'examine par secteur, et les différents secteurs ne sont pas clairement classifiés comme urbains, suburbains ou ruraux. Cependant, seule une très petite proportion du territoire couvert par la Corporation d'Urgences-santé est réellement rurale et une partie plus importante que cette dernière est urbaine. Quant aux objectifs minimaux, il est plus difficile de savoir s'ils sont réellement atteints. Toutefois, il est certain qu'une nouvelle optimisation de la planification des SPU a le

potentiel d'améliorer directement ou indirectement le délai de réponse. Il faut toutefois noter que le temps-réponse dépend aussi de plusieurs autres facteurs comme la localisation et les méthodes d'affectation des ambulances qui, selon nous, sont d'autres aspects de la problématique où l'utilisation de l'informatique et des techniques de recherche opérationnelle sont très utiles.

Les interventions sont définies comme étant tous les événements nécessitant le déplacement d'une ambulance jusqu'à un point où des actions de soins préhospitaliers sont nécessaires, alors que les transports sont définis comme étant toute intervention où le patient est transporté jusqu'à un centre de traitement. Les transports sont divisés en deux types : les « 9-1-1 » qui sont les transports urgents et les « inter-établissements » qui sont effectués d'un centre de traitement (hôpital, clinique, *etc.*) à un autre. La corporation fournit en moyenne 549 transports par jour, alors que le nombre moyen d'interventions est environ de 700 (Taillefer et Blais, 2012). Les « inter-établissements » représentent environ 100 transports par jour en moyenne. Cette distinction entre transports « 9-1-1 » et « inter établissement » est importante pour le calcul de la demande de service puisque le niveau de priorité n'est pas le même. Toutefois, l'évaluation finale de la demande inclut les deux types de transport sans distinction.

Finalement, 5.500 d'heures supplémentaires sont travaillées à tous les mois sur un total de 70.000 d'heures, ce qui n'est pas une proportion négligeable et augmente donc le risque d'accidents de travail de même que celui d'absentéisme. La méthode de planification et de gestion des SPU utilisée a un impact direct sur cette statistique.

4.1.2.3 Situation financière

Sur des revenus totaux de plus de 80 millions de dollars, environ 54 millions de dollars proviennent de subventions alors que seulement 27 millions proviennent de revenus de transport (Urgences-santé, 2013b). Toutefois, sur ces revenus de transport, seulement un peu plus de 6.5 millions proviennent de particuliers, le reste provenant d'organismes publics tels le Ministère de la Santé et des Services Sociaux ou encore la Société de l'Assurance Automobile du Québec. Plus de 90 % des revenus de la Corporation d'Urgences-santé

proviennent donc de fonds publics. Sur ce budget, les coûts d'embauche et les charges sociales totalisent près de 50 millions de dollars (Urgences-santé, 2013). Le coût d'un horaire dépend non seulement du nombre d'heures travaillées et du nombre de véhicules nécessaires, mais aussi du niveau ergonomique et de façon générale du niveau du respect du bien-être des employés minimalement requis lors de la planification des services. Par conséquent, les coûts de gestion des SPU sont directement liés à la qualité et au mode de gestion établi. Le financement par l'État amène toujours la même problématique : il faut recevoir suffisamment de fonds pour fournir un niveau acceptable de service, mais il ne faut pas non plus coûter trop cher aux contribuables. L'optimisation des opérations, incluant celle de planification, est donc d'autant plus cruciale pour la corporation.

4.1.2.4 Contraintes de gestion

Une des caractéristiques principales du milieu ambulancier est sa forte syndicalisation. En conséquence, chaque décision ayant un impact sur les conditions de travail des employés, telle que celles reliées à la planification des SPU, doit être revue à la fois par la direction et par le syndicat des ambulanciers afin d'obtenir un consensus. Ceci permet de maintenir les bonnes relations de travail. Ainsi, les règles actuelles de base qui influent sur la planification des SPU chez la Corporation d'Urgences-santé sont celles dictées par la convention collective des ambulanciers et par les contraintes logistiques de l'entreprise. À celles-ci viennent se greffer d'autres restrictions exigées implicitement par les employés. Par exemple, aucune règle syndicale n'exige un nombre d'heures minimum pour la durée d'un quart; cependant, les gestionnaires de la Corporation d'Urgences-santé savent très bien qu'il serait mal vu d'offrir des quarts de moins de sept heures aux ambulanciers.

La présente sous-section est divisée en quatre parties : 1) les règles issues de la convention collective, 2) les contraintes logistiques qui sont documentées par la Corporation d'Urgences-santé, 3) les contraintes financières ainsi que 4) les règles implicites que nous avons recensées au cours de notre travail de recherche. Cette dernière liste étant informelle est considérée comme une énumération non exhaustive des préférences des ambulanciers.

4.1.2.4.1 Règles issues de la convention collective

Le Tableau 4.1 suivant résume les principales règles dictées par la convention collective ayant un impact sur la planification des SPU. Celles-ci proviennent de la convention collective actuellement en vigueur entre la Corporation d'Urgences-santé et les techniciens ambulanciers du Québec.

Tableau 4.1 Règles issues de la convention collective

Règle	Description
Nombre d'heures annuels	Règle générale : un seul horaire par année prévaut
Type d'heures	Si possible, les horaires générés doivent être à temps complet.
Durée des semaines de travail des salariés à temps complet	En incluant les périodes de vérification de véhicule, la durée moyenne de la semaine de travail est 1) Quarts de 8h : 38,75 heures, 2) Quarts de 9h : 36,75 heures, 3) Quarts de 10h : 38 heures et 4) Quarts de 12h : 39,375 heures. Sur une période de deux semaines, le total des heures de travail est d'un minimum de 73,50 heures et d'un maximum de 85 heures.
Nombre maximum d'heures de travail	Le total des heures travaillées à taux régulier et supplémentaire ne doit pas dépasser 16 heures par période de 24.
Nombre de jours de repos	Un horaire doit prévoir une moyenne de deux jours de repos par semaine de travail.
Nombre de fins de semaines de congé	Les horaires de travail doivent assurer aux salariés à temps complet, soit : 1) Une fin de semaine sur deux de congé, ou 2) Deux fins de semaine sur cinq de congé. La fin de semaine constitue une période de 48 heures continues comprenant le samedi et le dimanche.
Nombre minimum d'heures entre deux quarts	Il doit s'écouler un minimum de 12 heures pour les salariés à temps plein et 10 heures pour les salariés à temps partiel entre la fin et la reprise du travail (et il ne faut pas générer deux quarts dans la même journée).
Délai au début d'un quart de travail	Une durée de 15 minutes est nécessaire à chaque début de quart afin de vérifier le véhicule (5 minutes) et de prendre connaissance de l'information (10 minutes). Le véhicule est considéré en service après sa période de vérification.

Début des plages horaires	Les heures de début de quarts doivent se situer dans les plages horaires suivantes : <ul style="list-style-type: none"> • Jour : 06h00 à 09h00 • Soir : 14h00 à 18h30 • Nuit : 22h00 à 00h00
Durée des pauses-repas	<ul style="list-style-type: none"> • Quarts de 8h et 9h : 30 minutes • Quarts de 10h : 45 minutes • Quarts de 12h : 60 minutes
Attribution des horaires	Les quarts sont attribués selon le choix des ambulanciers à temps complet puis aux ambulanciers à temps partiel, par ordre d'ancienneté

4.1.2.4.2 Règles relatives aux contraintes logistiques

Les règles relatives aux contraintes logistiques concernent en majeure partie la gestion de la flotte de véhicules et la capacité d'accueil des centres opérationnels. Celles-ci sont énumérées dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2 Règles relatives aux contraintes logistiques

Règle	Explication
Délai d'entretien d'un véhicule entre deux quarts.	Le délai d'entretien d'un véhicule entre deux quarts est d'environ une heure. Le véhicule n'est pas disponible durant cette période.
Nombre maximal de véhicules disponibles en même temps.	Le nombre maximal de véhicules pouvant être en service en même temps est de 82 % des ambulances disponibles.
Nombre maximal de véhicules pouvant débiter leur quart au même moment.	Afin d'éviter les problèmes d'achalandage aux centres opérationnels dus à leur capacité d'accueil, le nombre maximal de véhicules pouvant débiter leur quart au même moment est de plus ou moins 40.
Capacité des lieux physiques.	Il faut limiter le nombre de départs simultanés d'un même centre opérationnel à environ 8 véhicules.

4.1.2.4.3 Contraintes financières :

Les contraintes budgétaires limitaient antérieurement la planification des SPU à un total de 950 000 heures annuelles, ce qui n'est présentement plus suffisant pour couvrir la demande. En effet, le nombre d'heures nécessaires pour couvrir la demande était bien supérieure à ce chiffre au cours de l'exercice 2012, selon les normes de service et le mode de planification actuellement utilisé par la Corporation d'Urgences-santé.

Durant les mois précédents cette étude, la direction de la corporation a augmenté le nombre d'heures de travail disponibles, sans toutefois établir de façon précise la nouvelle valeur de cette contrainte. Cette relaxation des contraintes budgétaires a été faite entre autres dans le but de pouvoir étudier la possibilité d'implantation d'un concept d'équipe de véhicules qui grouperait de 3 à 5 véhicules. L'attrait de cette notion de groupe réside dans le fait que tous les ambulanciers paramédicaux sur ces véhicules auraient le même horaire de travail. Bien sûr, une telle structure réduirait la flexibilité de la planification, et augmenterait donc les coûts.

La direction de la corporation évalue toutefois que l'augmentation de ces coûts à court terme devrait être compensée par des gains à long terme issus d'une augmentation du sentiment d'appartenance à l'organisation, d'une hausse de la performance et éventuellement d'une diminution de l'absentéisme. Bien que le but de cette étude ne soit pas de juger de la pertinence de ce choix de gestion, il faut toutefois prendre en compte une telle structure d'équipe. Une analyse de l'évolution historique de la demande (Urgences-santé, 2012c) montre clairement l'augmentation constante de celle-ci sur les 5 dernières années. Avec ou sans l'implantation des équipes, peu importe la méthode de planification, si la tendance se maintient, on peut s'attendre à voir augmenter le budget alloué au nombre d'heures travaillées durant les prochaines années. Cette augmentation probable justifie d'autant plus la nécessité d'optimiser le mieux possible la gestion des services préhospitaliers d'urgence.

4.1.2.4.4 Règles implicites

En plus des règles liées à la convention collective et aux contraintes logistiques, il existe plusieurs normes informelles dont les gestionnaires doivent tenir compte dans la planification des SPU. Le Tableau 4.3 énumère les principales règles de gestion découlant de ces normes. Les règles implicites relèvent en majeure partie du bon sens commun. Somme toute, le nombre de règles régissant la planification des SPU chez la Corporation d'Urgences-santé est élevé et certaines d'entre elles sont particulièrement contraignantes. Par exemple, la convention collective implique l'utilisation d'un seul horaire par année, cette contrainte ne permet pas de proposer des modèles horaires saisonniers qui peuvent mieux répondre à la variation saisonnière de la demande. Un autre exemple, la règle implicite qui contraint le plus la planification des SPU est celle concernant le positionnement des pauses-repas. Plus l'étalement de ces heures est restreint, plus le nombre d'effectifs totaux doit être élevé afin de bien couvrir la demande. De plus, il faut noter que les règles issues de la convention collective et les contraintes logistiques sont peu reliées à la qualité de la planification.

Tableau 4.3 Règles implicites

Règle	Explication
Durée des quarts	<ul style="list-style-type: none"> • Minimum : 8 heures; • Maximum : 12 heures.
Horaires de semaine	Il doit exister un type d'horaire qui offre des quarts uniquement les jours de semaine. (Actuellement, l'horaire de base répond à cette exigence.)
Fins de semaine de travail	Si possible : 1) Minimiser le nombre de fins de semaine brisées travaillées et 2) Minimiser le nombre de fins de semaine consécutives travaillées
Nombre maximum de jours de travail consécutifs	<p>Il faut limiter le nombre de jours de travail consécutifs à :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Quarts de 8h et 9h : 6 jours; • Quarts de 12h : 5 jours. <p>Cette règle ne s'applique qu'aux horaires de base. Les horaires mensuels peuvent contenir au-delà de 10 jours consécutifs de travail.</p>

Nombre minimum de jours de travail consécutifs	Quel que soit le type de quart de travail, il est préférable d'éviter les quarts de travail orphelin (non consécutif).
Nombre minimum de jours de congé consécutifs suite à une séquence de travail	Si possible, chaque horaire devrait offrir au minimum deux jours de congé consécutifs suite à toute séquence de travail de jour ou de nuit.
Amplitude des heures de débuts de quarts d'un même horaire de base	Il faut minimiser l'écart entre les heures de début de quarts de chaque horaire de base. Préféablement, l'amplitude de ces heures devrait être nulle.
Positionnement de la pause-repas	La pause-repas doit se situer à au plus 75 minutes de la médiane du quart.
Répartition des quarts par secteur	La répartition des différents types de quarts entre les secteurs doit être équilibrée de façon à ne pas créer d'injustice.
Équilibre entre les semaines de travail	Il faut favoriser un certain équilibre entre les semaines de travail en répartissant les quarts de façon le plus uniforme possible.

En conclusion, cette présentation de la Corporation d'Urgences-santé nous a permis de prendre connaissance des enjeux relatifs à la planification des ambulanciers et des SPU. Cette problématique complexe implique l'estimation de la demande de service, la gestion des ambulanciers, la gestion de la flotte de véhicules, ainsi que la prise en compte de nombreuses contraintes relatives à ce contexte de travail. La description de la situation des ressources humaines et matérielles ambulancières, de leurs planifications actuelles et des méthodes de gestion de celles-ci nous indique qu'il y a place à l'amélioration et à tous ces niveaux afin d'améliorer la qualité des services tout en réduisant le temps-réponse des ambulanciers paramédicaux. La suite de cette revue de la littérature offre une analyse critique de la planification des SPU et de leurs méthodes de gestion afin de cibler les améliorations spécifiques pouvant être apportées.

4.1.3 Demande de services

Il apparaît essentiel de donner un bref aperçu du facteur clé influençant le mode de planification chez la Corporation d'Urgences-santé, soit la demande de services. Ceci permettra de saisir l'importance d'une évaluation précise de la demande des besoins en soins

ambulanciers dans le processus de planification. Nous présentons les normes de service imposées à la Corporation d'Urgences-santé, ainsi qu'une présentation de la méthode actuelle d'évaluation de la demande et un exemple de la demande de services actuellement utilisée.

4.1.3.1 Normes de service

Le respect des normes de service chez la Corporation d'Urgences-santé est le facteur clé expliquant l'importance d'une estimation juste de la demande et d'une planification des SPU de qualité. Actuellement, il n'existe pas de normes de temps-réponse approuvées formellement par le conseil d'administration de la Corporation d'Urgences-santé. Les objectifs de performance poursuivis par les ambulanciers sont donc ceux divulgués par le MSSS (MSSS, 2011), tel que présentés dans le Tableau 4.4.

Tableau 4.4 Normes de performance du MSSS

Territoire	Objectif minimal	Objectif visé
Urbain	80 % des appels urgents en moins de 8 minutes	90 % des appels urgents en moins de 8 minutes
Suburbain	80 % des appels urgents en moins de 15 minutes	90 % des appels urgents en moins de 12 minutes
Rural	80 % des appels urgents en moins de 30 minutes	90 % des appels urgents en moins de 30 minutes

Selon ces critères de base, la Corporation d'Urgences-santé a établi une charte de règles et de priorités d'affectation des appels. Le niveau de priorité d'un appel dépend de la gravité de l'état des personnes secourues. À chaque niveau de priorité correspondent un délai maximal d'arrivée, des effectifs possibles et des normes de transport. L'échelle de priorité va de 1 (très urgent) jusqu'à 8 (selon les disponibilités). Par exemple, un appel de priorité 1 exige un délai de réponse de 5 à 8 minutes, peut nécessiter l'implication d'un médecin, d'un superviseur et des premiers répondants, et exige l'utilisation des gyrophares.

Le degré d'atteinte de ces objectifs a un fort impact sur l'estimation de la demande en soins ambulanciers, sur le nombre d'ambulances nécessaires sur le terrain et sur le budget global de la Corporation d'Urgences-santé. La Figure 4.2 indique la relation entre le nombre de véhicules en disponibilité sur le territoire et le temps-réponse moyen pour les appels de priorité 1, selon les données historiques de 2011.

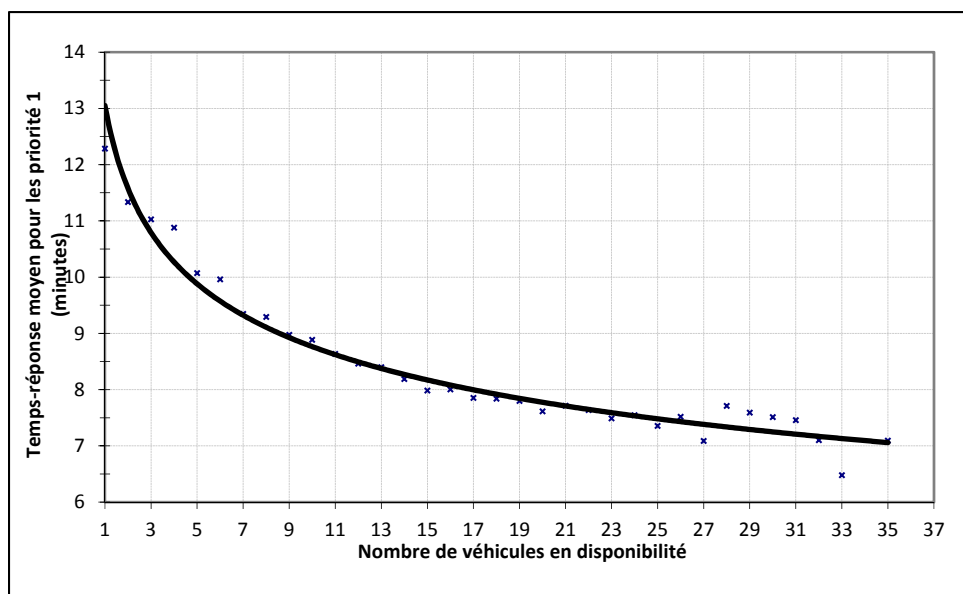


Figure 4.2 Relation entre le temps-réponse et le nombre de véhicules en service

Nous constatons que le temps-réponse moyen diminue de façon exponentielle avec l'augmentation du nombre de véhicules disponibles. Il s'agit d'une contrainte considérable dans la planification des services de la Corporation d'Urgences-santé qui influence directement l'estimation de la demande.

4.1.3.2 Estimation de la demande

Suite à ces constats, il apparaît évident que l'estimation de la demande doit être effectuée le plus précisément possible afin de répondre dans les délais prescrits à tous les appels et d'éviter le gaspillage de ressources. Actuellement, la planification des SPU chez la Corporation d'Urgences-santé repose sur une estimation de la demande qui est composée de deux variables principales : 1) la couverture territoriale désirée et 2) la quantité d'appels reçus. La couverture territoriale représente le nombre de véhicules devant être positionnés sur

le terrain afin de pouvoir atteindre en moins de 8 minutes 59 secondes n'importe quel endroit situé à Montréal ou Laval. Ce laps de temps a été fixé par le Ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec. Ainsi, il a été calculé qu'en fixant dix ambulances à certains points d'attente stratégiques du territoire, la Corporation d'Urgences-santé s'assure de pouvoir répondre à un appel dans un temps raisonnable, qu'il soit situé n'importe où sur ce territoire. Donc, la couverture désirée indique le seuil minimal fixe d'ambulances devant être en service à tout moment de la journée.

En ce qui concerne le nombre d'appels reçus, il fait référence à tous les appels parvenant à la centrale téléphonique de la Corporation d'Urgences-santé. Contrairement à la demande relative à la couverture du territoire qui est fixe à toute heure de la journée, la quantité d'interventions est plutôt variable en fonction du temps, ce qui rend son estimation encore plus complexe. Pour bien comprendre le principe de l'intervention, il faut se rappeler qu'il existe deux types d'appels reçus par la Corporation d'Urgences-santé, soit les appels imprévisibles (urgents) et les appels prévisibles (transports inter-établissements). L'estimation de ces deux composantes de la demande est réalisée de façon distincte, car leurs sources sont totalement différentes.

Les transports inter-établissements permettent à certaines personnes hospitalisées d'être transférées vers un nouveau centre hospitalier afin d'y recevoir des soins spécialisés. Bien que le nombre d'interventions de ce type soit considéré comme prévisible, il ne peut être connu que quelques jours à l'avance, voire la journée même.

Quant aux appels imprévisibles, ils sont communément appelés les appels 9-1-1. Il va sans dire que la fréquence de ces appels est fortement aléatoire. De plus, leur quantité et leur durée sont influencées par une multitude de facteurs, comme le trafic routier, les conditions climatiques, les festivités, *etc.* Dans les faits, lorsqu'un citoyen compose le 9-1-1, son appel est acheminé à la centrale téléphonique de Montréal ou Laval. Si l'appel demande l'envoi d'une ambulance, il est ensuite envoyé aux répondants médicaux d'urgence travaillant chez la Corporation d'Urgences-santé. Ces derniers analysent, selon un protocole précis, la situation décrite par l'appelant et classifient l'appel selon la liste de priorité décrite précédemment. Il faut savoir que parmi tous les appels urgents reçus, seul un certain pourcentage nécessite une

affectation de ressources ambulancières. En effet, lorsque les répondants médicaux d'urgences filtrent les appels, ils peuvent conclure qu'aucune ambulance n'est nécessaire sur les lieux de l'incident. De plus, il peut y avoir plusieurs appels pour un même incident. Ainsi, la quantité d'appels n'est pas nécessairement représentative du nombre d'interventions sur le terrain.

Malgré ce fait, la méthode d'estimation de la demande utilisée par le passé n'a jamais fait de distinction entre un appel pour lequel une ambulance doit se déplacer sur le territoire et un appel ne nécessitant aucune intervention. Cette faiblesse a récemment suscité le développement d'une nouvelle méthode d'estimation de la demande par le service de statistiques et recherche opérationnelle de la Corporation d'Urgences-santé.

De façon plus spécifique, pour estimer la portion variable de la demande, la Corporation d'Urgences-santé utilise des données historiques détaillées sur la quantité d'appels reçus à chaque demi-heure. Une moyenne annuelle des appels par jour est calculée. Cette moyenne est ajustée grâce à un facteur de la loi Normale représentant environ un écart-type. Il s'agit donc d'un calcul probabiliste qui assure à la Corporation d'Urgences-santé de pouvoir répondre à temps à 85 % des appels de priorité 1. Ce pourcentage peut paraître faible pour un service qui concerne la survie de la population. Toutefois, le 15 % des appels non couvert est pris en compte grâce à la planification mensuelle et à la gestion quotidienne des interventions. Par exemple, si les ambulanciers reçoivent plus d'appels urgents en début de journée que prévu, ils peuvent déplacer certains appels de moindre importance, tels que les transports inter-établissements, plus tard dans la journée.

Ainsi, afin de simplifier la planification des SPU, la Corporation d'Urgences-santé calcule la demande moyenne de services pour chaque jour de la semaine. De cette façon, on obtient une demande estimée identique pour toutes les semaines de l'année. Bien entendu, cette demande ne tient pas compte des variations dues aux fluctuations saisonnières et aux événements ponctuels. Ces variations sont prises en compte lors des ajustements mensuels permettant d'ajuster le niveau d'effectif sur le terrain. Par exemple, lors d'une saison creuse, le responsable de la planification évite de combler tous les postes des employés absents car il sait que la demande estimée est supérieure à la demande réelle de cette période.

En somme, une fois les deux composantes de la demande estimées, on obtient la demande prévue totale. Celle-ci est évaluée de façon globale pour tout le territoire et non par secteur. On vient donc ensuite la diviser en secteur lors de la distribution finale. En outre, la demande peut être présentée selon diverses bases de référence allant d'une heure de la journée, au mois de l'année, en passant par une journée ou une semaine. La Corporation d'Urgences-santé estime sa demande selon les demi-heures de la journée ce qui permet plus de flexibilité dans la planification des services et une meilleure réponse aux appels.

Afin de compléter notre description de la demande utilisée pour planifier les services chez la Corporation d'Urgences-santé, nous présentons à la Figure 4.3 la demande moyenne en heures estimée pour les vendredis de l'année 2012-2013.

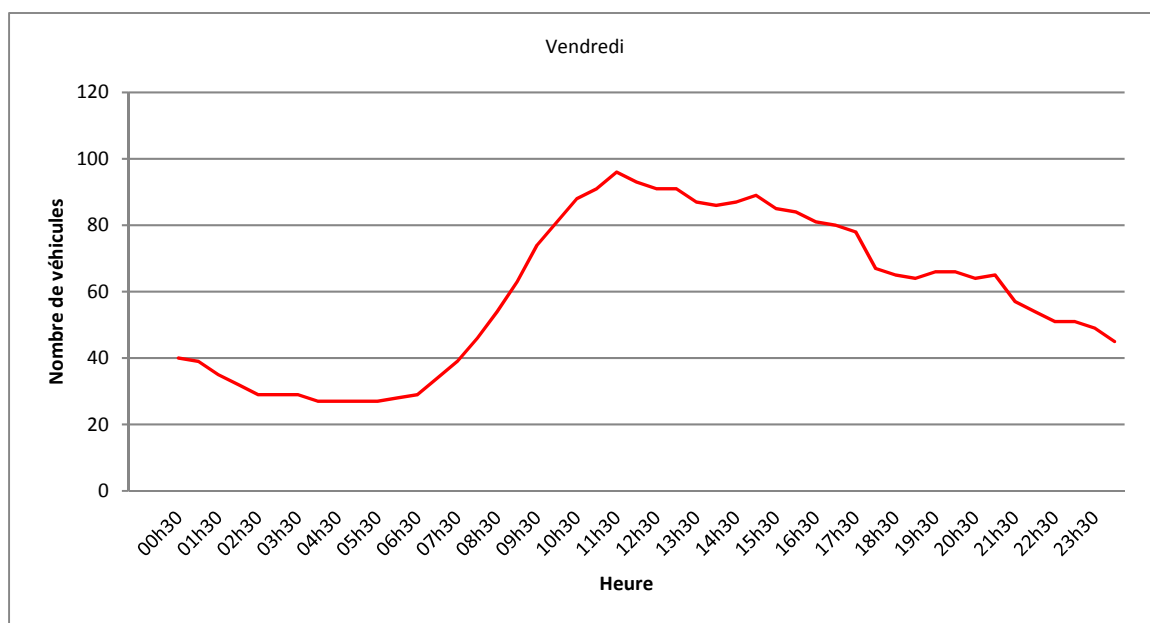


Figure 4.3 Demande estimée pour les vendredis de 2012-2013

Ceci nous permet de visualiser les variations de la demande durant la journée. En fait, il semble y avoir un maximum d'appels entre 10:00 et 17:00, alors que le nombre d'appels se trouve à son plus bas niveau de 3:00 à 6:00. Ces variations ont pour conséquence de rendre la confection des horaires encore plus complexe, car elles forment une courbe de demande plutôt irrégulière. Les sept courbes de demande quotidienne sont disponibles à l'ANNEXE I

(p. 167). Selon ces graphiques, la demande est semblable du lundi au vendredi, alors qu'elle est plus faible le samedi et le dimanche.

En conclusion, l'analyse de la demande est un facteur clé dans la conception des horaires chez la Corporation d'Urgences-santé. Étant instable et difficilement prévisible, elle est la raison majeure de la complexité du problème d'optimisation de planification. Ce travail de recherche ne vise pas l'amélioration de l'estimation de cette demande. Tel que précisé auparavant, une équipe de la Corporation d'Urgences-santé a déjà réalisé quelques analyses à ce sujet, ce qui a permis de générer de nouvelles courbes de demande ajustées plus réalistes. De plus, ce sont ces courbes ajustées de demande qui seront utilisées pour tester notre nouvelle approche de planification et de gestion des SPU.

4.2 État de l'art : la planification

La planification est un domaine de recherche très large. La planification du personnel n'est qu'une des différentes branches de la planification. Toutefois, très peu d'articles de planification des ressources touchent les services d'ambulances, ou même les services d'urgence en général (par exemple : police, pompier, *etc.*).

En ne faisant qu'un survol rapide de la littérature, on peut noter que très peu d'articles reprennent des modélisations de problèmes déjà utilisées auparavant. Ceci est vrai même si un très grand nombre d'articles s'attaquent à des problèmes ayant beaucoup de points communs. Par exemple, on retrouve plus de 100 articles uniquement sur le personnel infirmier tel que recensé dans Ernest *et al.* (2004b). C'est en soi, sinon une preuve, au moins un indice de la spécificité de chaque problème de planification des ressources, ainsi que de la difficulté d'adapter un modèle existant à un nouveau problème. La situation est similaire pour la plupart des autres problèmes de planification du personnel (p.ex. : médecins, chauffeurs d'autobus, *etc.*).

Les modélisations et les solutions proposées sont donc généralement spécifiques à chaque situation. Après avoir examiné plusieurs articles (Wright et Mahar, 2013 ; Smet *et al.*, 2013 ; Zhang *et al.*, 2013), on remarque que les techniques d'optimisation quant à elles se recoupent

fréquemment, bien qu'il en existe plusieurs différentes. Ces dernières sont d'ailleurs généralement utilisées aussi bien dans la planification des ressources que dans n'importe quelle autre branche de la recherche opérationnelle. Cependant, celles-ci doivent être adaptées dans une certaine mesure aux caractéristiques et aux spécificités du modèle. C'est la raison pour laquelle nous nous limiterons principalement à la littérature à la planification des ressources du personnel, même pour l'étude des techniques d'optimisation. Plusieurs travaux de recherche pourraient être faits sur l'ensemble des différents éléments qui seront abordés dans cette revue de la littérature, tellement la littérature en planification des ressources est grande. La revue se limitera donc à l'essentiel de l'information ainsi qu'à l'information utile à tirer de chacun des différents éléments qui seront exposés dans la perspective du développement de notre propre modèle.

Les deux premières sections présentent les éléments environnementaux touchant la planification du personnel en général afin d'élaborer et de définir certaines notions importantes. Par la suite, on énumère et on définit les différents types de facteurs qui sont pris en compte dans les problématiques de planification des ressources. Ces deux aspects ont l'objectif de fournir une vue d'ensemble globale du type de problématique que nous étudions.

La section suivante définit et décrit les applications les plus importantes étudiées dans la littérature ainsi que certains détails de leurs modélisations de même que les méthodes les plus importantes de résolution pour ces applications. Ces deux sections, qui seront les parties principales de la revue, ont pour objectif de fournir au lecteur une compréhension à la fois pratique et technique de la planification des ressources en recherche opérationnelle.

4.2.1 Les applications de planification du personnel

Étant donné le petit nombre d'articles dans la littérature étudiant des problèmes de planification des SPU, cette section énumérera et exposera les applications les plus importantes ayant des points en commun avec le problème des ambulanciers paramédicaux. La complexité de ces applications sera discutée ainsi que les impacts que l'implantation d'une méthode d'optimisation aura pu avoir dans chaque cas.

Les applications générales de planification du personnel seront présentées en premier. Les applications de personnel de sécurité et de police seront ensuite présentées, puis suivront celles de transport en commun et d'aviation commerciale. Ces premières applications sont celles qui ont le moins de ressemblances avec le cas traité dans ce travail de recherche, mais certaines d'entre elles sont parmi les plus étudiées et les plus importantes dans la littérature en planification du personnel. Ensuite suivront les applications de personnel infirmier et de médecins, les plus semblables au problème des ambulanciers paramédicaux. Finalement, un article typique sur la planification des ambulanciers paramédicaux sera présenté.

4.2.1.1 Applications générales de planification du personnel

Les modèles se voulant des applications pouvant répondre à plusieurs différents problèmes de planification du personnel posté sont forcément très généraux et ne peuvent donc pas profiter de la structure particulière d'un problème particulier pour aller chercher de meilleurs résultats. Toutefois, la capacité de ces applications à résoudre des problèmes réels n'est pas très grande. Certaines de ces applications cherchent à fournir un éventail de solutions parmi lesquelles un dirigeant pourra ensuite choisir celle qui convient le mieux à sa situation spécifique (Carravilla *et al.*, 2013). D'autres utilisent plutôt des méthodes adaptatives qui disposent d'un ensemble de méthodes de résolutions à leur disposition, et qui choisissent parmi celles-ci la ou les meilleures pour résoudre le problème (Liu et Wang, 2013 ; Alexiadis et Refaidis, 2013).

Le niveau de complexité de la structure du problème étant plus bas dans ce type d'applications, il n'est pas rare de voir des méthodes mathématiques exactes ou en partie exactes être employées pour les résoudre, d'autant plus que le contexte est plus souvent académique qu'opérationnel, ce qui enlève de la pression au niveau de l'urgence d'obtenir des résultats ainsi qu'au niveau de la complexité du problème à résoudre. Les méthodes exactes sont de toute façon les mieux adaptées à ces problèmes puisque la plupart des heuristiques sont axées sur l'environnement et ne sont donc pas flexibles aux changements environnementaux (Kassa et Tizazu, 2013). Les modèles mathématiques sont aussi mieux adaptés au cas cyclique, bien que certaines études portent sur le cas acyclique tel celle de Mason (2001).

4.2.1.2 Sécurité et services de police

Les problèmes de planification de personnel de sécurité et de personnel policier (qui inclut d'ailleurs les ambulances) ne sont pas très fréquemment étudiés. De plus, plusieurs articles n'étudient pas des problèmes de gestion de personnel mais plutôt de gestion de véhicules. Mills et Panton (1992) sont parmi les rares à avoir examiné la planification de ce type d'employés. Il ne s'agit pas d'ailleurs d'un service de police, mais plutôt d'un service de sécurité dans un casino. Ce problème est plus simple que celui de police puisqu'il n'y a pas d'assignation de véhicules nécessaire. Le fait que les employés soient du personnel de sécurité n'a d'ailleurs pas une grande influence sur la spécificité du problème puisque peu de critères rares ou spécifiques y sont rencontrés.

En somme, c'est un modèle qui ressemble à une application générale. Toutefois, un aspect intéressant du modèle de Mills et Panton est qu'on y retrouve une répartition relativement égale de contraintes dures et de contraintes souples. C'est une situation semblable à celle que l'on retrouve chez la Corporation d'Urgences-santé puisqu'il faut y prendre en compte à la fois les règles de la convention collective de même que les règles ergonomiques et les préférences avec autant d'importance les unes que les autres.

4.2.1.3 Transport en commun

Les applications de transport en commun sont généralement de très gros problèmes. En effet, les coûts d'embauche dans un contexte urbain opérant une flotte d'environ mille autobus peuvent s'élever aux environs de 90 millions de dollars par année (Wren, 1995). Diminuer ces coûts d'un petit pourcentage se traduit donc en économies importantes. De plus, les systèmes informatiques épargnent ici généralement entre 1 % et 4 % du coût par rapport aux solutions manuelles (Wren, 1995). Le potentiel de ces systèmes pour le transport en commun est donc bien réel.

Étant donné le grand nombre de services de transport en commun à travers le monde et leur importance stratégique pour plusieurs villes, il n'est pas surprenant que cette application se retrouve au premier rang pour le nombre d'articles publiés dans le recensement d'Ernest *et al.*

(2004a). Ce type d'application est même plus publié que les applications de personnel infirmier malgré le fait que le secteur de la santé soit un terrain de recherche prisé depuis les dernières années. Cependant, toutes les applications de « planification » pour le transport en commun ne sont pas de la planification de personnel, certaines se concentrant uniquement sur l'assignation d'un véhicule autobus à un certain horaire et trajet (pour un exemple, voir Savsar *et al.*, 2013). De plus, les applications concernant le personnel sont généralement dans une optique différente de celle de la planification des SPU telle qu'étudié ici. Pour le transport en commun, il faut généralement plutôt attribuer certains trajets à un chauffeur et c'est de cette façon que son quart est défini. Dans le contexte des ambulances, cette problématique existe aussi et il serait possible de l'étudier dans l'optique de l'assignation d'un ambulancier à une certaine ambulance dans un certain secteur. Cependant, la gestion des véhicules ambulanciers est plus simple.

Les problèmes de transport en commun ne se limitent d'ailleurs pas uniquement aux autobus, mais s'appliquent aussi au métro, aux trains et à tout autre système de transport en commun. Ces types de problèmes sont très proches du problème de planification de personnel de vol pour les compagnies d'aviation, un problème d'importance tout aussi stratégique sinon plus, qui est expliqué dans la section suivante.

4.2.1.4 Aviation commerciale

Les problématiques de planification d'aviation commerciale sont plus fréquemment étudiées. Il faut toutefois faire la distinction entre la gestion du personnel au sol dans les aéroports, et celle des équipages de vol, deux problèmes bien différents. Alors que le problème des équipages de vol, qui sera décrit dans le prochain paragraphe, ressemble beaucoup plus à celui du transport en commun par autobus (Mutera *et al.*, 2013), la problématique de planification du personnel au sol s'apparente beaucoup plus au problème du personnel infirmier.

La planification de personnel de vol est probablement la plus cruciale pour la survie des compagnies aériennes et est une des applications de planification ayant le plus grand potentiel, pouvant sauver plusieurs dizaines de millions de dollars annuellement aux

compagnies (Kohl et Karish, 2004). Cette application prouve aussi tout le potentiel qui peut exister dans une méthode mathématique de planification de personnel. Bien que cette problématique s'éloigne de la planification des ambulanciers paramédicaux tout comme celle du transport en commun, l'aspect d'assignation d'un groupe d'individus à un véhicule est une similarité importante. En effet, le véhicule auquel une équipe de vol est assignée est lui-même assigné à un certain horaire de trajet, et définit donc en soi la base de l'horaire de travail de l'équipage, d'où la similarité avec l'assignation d'un ambulancier paramédical à une ambulance. De plus, l'importance stratégique de ce problème et les impacts importants que ces solutions ont eu pour les entreprises aériennes font qu'il est nécessaire d'exposer cette application particulière. Tel que mentionné précédemment, cette problématique ressemble beaucoup à celle des autobus (Desrosiers *et al.*, 1997 ; Mutera *et al.*, 2013). Le module central dans cette problématique est l'équivalent de la cédule des quarts pour les ambulanciers paramédicaux. La qualité des horaires créés dépend principalement de la qualité de l'assemblage des différents vols pour un même équipage. Néanmoins, ce type de planification peut avoir un impact important, comme dans le cas d'Air France où le transporteur a réalisé des améliorations moyennes supérieures à 6 % (Desrosiers *et al.*, 1997). De plus, fait à noter, la technique d'optimisation utilisée par Desrosiers *et al.* (1997) est la génération de colonne, une technique fréquemment employée pour des problèmes de planification de personnel semblables à celui des ambulanciers paramédicaux.

Il y a plusieurs types de personnel au sol dans les compagnies aériennes. Certaines études s'intéressent à la confection des horaires du personnel de service à la clientèle des aéroports alors que d'autres étudient le personnel de manutention des bagages ou encore le personnel d'entretien des avions. Devendeville *et al.* (2013) proposent une étude portant sur ce type de problématique. Cette planification est très différente de la problématique de celle du personnel de vol. L'industrie du transport aérien étant très compétitive, chaque point de pourcentage économisé en coût peut valoir plusieurs millions à cause de la taille de l'entreprise, et peut faire la différence entre sa survie ou sa disparition.

La précision et l'optimalité des résultats sont donc souvent plus importantes ici qu'ailleurs, et c'est une des raisons pour lesquelles un grand nombre de systèmes de planification d'une très grande efficacité ont été développés dans ce domaine d'application.

4.2.1.5 Personnel infirmier

La problématique de planification pour le personnel infirmier est la plus étudiée après le transport en commun. La problématique consiste généralement soit à minimiser les coûts de personnel, soit à maximiser la satisfaction du personnel.

Cependant, comme dans la plupart des problèmes de planification de grands groupes de personnel, on y retrouve souvent plus de contraintes dures que de contraintes souples. Les préférences et l'ergonomie sont donc généralement traitées avec moins d'importance. On retrouve la situation opposée avec la planification des médecins qui sont traités dans la section suivante. Cependant, le type de contraintes dures rencontré dans les problèmes de personnel infirmier est très semblable à celui des ambulanciers paramédicaux, entre autres au niveau des conditions de travail. Ceci s'explique par le fait que les deux font face à des réglementations semblables et travaillent de façon continue 24h / 7 jours.

Plusieurs techniques de modélisation dans des cas de planification de personnel infirmier pourront donc nous servir de source d'inspiration. Les contraintes fréquemment rencontrées ici sont les suivantes, et elles sont tirées de la revue de planification du personnel infirmier de Cheang *et al.* (2003) :

- La demande minimale de personnel pour chaque période de l'horizon de planification,
- Les contraintes structurelles (par exemple : on ne peut pas assigner 2 quarts de travail au même moment à une seule personne),
- Le nombre minimal/maximal d'heures de travail sur une période donnée,
- Le nombre minimal/maximal de quarts de travail identiques consécutifs,
- Le nombre minimal/maximal de quarts ou de jours de travail consécutifs,
- Le niveau d'habiletés (ou catégorie) du personnel infirmier (généralement 2 ou 3 différents, fréquemment classés en fonction de l'expérience),
- Les préférences du personnel,

- Le nombre minimal/maximal de jours de congé (total ou consécutif),
- Le temps de repos minimum entre deux quarts,
- Le type de quart assigné,
- Les vacances et les congés,
- Les fins de semaines de travail ou de repos,
- Les combinaisons de catégories de personnel infirmier pouvant travailler en tandem,
- Les rotations des quarts.

Même si les contraintes de cette liste sont rencontrées de manière récurrente, on retrouve une très grande variété de modèles et de problématiques précises à cause du grand nombre de chercheurs qui ont étudié le problème. Par exemple, une hyper-heuristique (les hyper-heuristiques sont définies plus loin) a été développée pour construire un modèle flexible pouvant résoudre une variété de modélisations de problèmes de planification spécifiquement pour le personnel infirmier (Smet *et al.*, 2013). Un article a même été écrit spécifiquement sur la réaffectation de personnel dans le cas du personnel infirmier, un problème peu étudié où il s'agit de réaffecter un ou plusieurs quarts de travail suite, par exemple, à une absence de dernière minute non prévue dans la planification initiale (Moz et Pato, 2004). On retrouve aussi ici une très grande variété de modèles et d'approches de résolution, allant de la programmation en nombres entiers, jusqu'aux hyper-heuristiques, en passant par les méta-heuristiques et la génération de colonnes.

4.2.1.6 Médecins

À notre connaissance, les articles portant sur la planification de médecins ne se retrouvent pas en grand nombre dans la littérature. On est donc loin de la popularité que connaît le problème de planification du personnel infirmier. Pourtant, celui des médecins en salle d'urgence est semblable dans une certaine mesure au précédent, à la différence qu'une importance beaucoup plus grande est généralement accordée aux préférences du personnel et une importance moins grande aux règles de conditions de travail. Cette situation est d'ailleurs fréquente pour la planification de plus petits groupes de personnel.

L'objectif est donc généralement axé sur la maximisation du bien-être du personnel plutôt que sur la minimisation des coûts. On y retrouve donc plutôt des contraintes souples que des contraintes dures. Labbé (1998) a créé un horaire cyclique pour les médecins de salle d'urgence de l'hôpital Charles-Lemoyne (HCL). L'accent dans ce travail a été mis sur les préférences généralisées plutôt qu'individuelles et donc liées principalement à l'ergonomie des horaires. C'est une situation qui ne peut pas être reproduite dans le cas des ambulanciers paramédicaux de la Corporation d'Urgences-santé à temps partiel à cause des disponibilités variables entre les différents employés à différents moments de l'année. Cependant, l'étude de Labbé représente un intérêt entre autres à cause de la prise en compte des contraintes ergonomiques. Ce type de contrainte sera inclus dans notre propre modèle pour les ambulanciers paramédicaux de la Corporation d'Urgences-santé. Dans le cas des médecins, les méthodes d'optimisation de planification semblent être efficaces. Comme le montrent Gendron *et al.* (2000), l'utilisation d'un modèle mathématique a pu faire baisser de 185 à 111 le nombre de contraintes violées par l'horaire confectionné. Étant donné que médecins et infirmiers travaillent sur le même lieu, les contraintes dures des médecins sont souvent très semblables à celles des infirmiers, bien qu'en moins grand nombre. Étant donné que nous avons déjà examiné le personnel infirmier, nous nous attarderons ici plutôt sur les contraintes souples (de préférence, ergonomiques, *etc.*). Voici les contraintes souples rencontrées dans Labbé (1998) :

- Minimiser le nombre de fins de semaine où le médecin travaille une seule journée sur deux,
- Minimiser le nombre de fins de semaine consécutives pendant lesquelles un même médecin travaille,
- Observer des séquences de travail composées d'un nombre minimum et maximum de quarts consécutifs,
- Observer un nombre minimum et maximum de jours de congés consécutifs suite à chaque séquence de travail de jour ainsi qu'à chaque séquence de travail de nuit selon sa longueur,

- Respecter une séquence de quarts de travail qui soit ergonomique à l'aide d'une succession de quarts respectant une rotation vers l'avant (matin, midi, soir, nuits), en plus d'observer une distribution espacée des séquences de travail de nuit.

Ces contraintes constituent la majorité des contraintes prises en compte dans Labbé (1998), mais il faut bien sûr rajouter certaines contraintes dures telles que la couverture de la demande par exemple. Le problème étudié par Labbé est résolu sur un horizon de 3 semaines pour une douzaine de médecins. En partant du principe que la planification faite à la main était bonne, mais qu'il ne tenait pas compte des fins de semaine et des vacances, Labbé a conçu une méthode de recherche avec tabous afin de résoudre le problème d'horaires de HCL. La méthode de Labbé fonctionne comme suit : une solution initiale produit un horaire très simple et ergonomiquement très mauvais, qui couvre cependant entièrement la demande pour chaque journée. La méthode de recherche avec tabou utilisée par la suite ne fait que des échanges qui conservent la couverture de la demande. Labbé explore le domaine des solutions à l'aide de 3 différents voisinages (V#) ; V1 ne fait que des échanges entre deux quarts d'une même colonne, V2 échange des blocs de 2 ou 3 quarts de colonnes adjacentes entre deux lignes, et V3 échange des blocs de 3 quarts adjacents qui commencent par des quarts de nuit. Ce dernier voisinage est donc un sous-ensemble de V2 utilisé à des fins de diversification. Les horaires construits par Labbé sont jugés très satisfaisants et ont été implantés par HCL. Buzon-Cantera (2001) quant à lui étudie deux problèmes distincts. Premièrement, il reprend les travaux de Labbé pour HCL dans le but d'y apporter certaines améliorations.

Selon Buzon-Cantera, la méthode de recherche par tabous (RT) de Labbé n'explore pas une assez grande partie de l'espace des solutions. Une RT modifiée est donc conçue, conservant la plupart des voisinages utilisés par Labbé tout en y incorporant de nouveaux voisinages plus complexes. Le V1 et V2 de Labbé sont réutilisés, auxquels sont rajoutés les nouveaux V4 et V5. V4 échange le long d'une même colonne un quart qui était une fin de suite de travail et qui devient, suite au déplacement, un début de suite de travail. C'est donc un sous-ensemble de V1. V5 quant à lui sélectionne tout un groupe de travail d'une même ligne et l'échange avec un groupe de congés correspondant aux mêmes colonnes sur une autre ligne.

Un mécanisme de diversification de poids est aussi implanté afin d'éviter le cyclage et d'explorer une plus grande partie de l'espace des solutions. La méthode de Buzon-Cantera obtient un meilleur résultat que celle de Labbé.

Le deuxième problème étudié par Buzon-Cantera est celui des médecins de salles d'urgences de l'hôpital général juif de Montréal (HGJ). Avant l'étude, ce problème était résolu à la main à l'aide de procédures semi-automatiques implantées sur des logiciels tel Microsoft Excel par exemple. Cette approche produisait d'assez bons horaires, mais était très coûteuse en temps de résolution. Contrairement aux horaires de HCL, ceux-ci sont des horaires individualisés selon les préférences des médecins. Un total de six différents critères de préférence sont utilisés. De plus, la complexité du problème est aussi augmentée par le fait que la demande varie en fonction des jours fériés et des fins de semaine. L'horizon de résolution est aussi de trois mois, ce qui est beaucoup plus long que le cycle du problème étudié par Labbé. Les autres contraintes sont principalement d'ordre ergonomique. La méthode de résolution utilisée est toujours la méthode de recherche avec tabous. Pour l'exploration du domaine des solutions, V1 et V2 de Labbé ont été conservés. V7, qui explore tous les échanges possibles entre blocs de 1, 2 ou 3 quarts, et V8, qui explore les échanges possibles entre deux colonnes complètes, sont les deux nouveaux voisinages ajoutés. Une diversification par changement de poids est aussi utilisée. La qualité des horaires obtenus par la méthode de recherche avec tabous est jugée équivalente à celle obtenue par HGJ. Toutefois, la méthode de recherche avec tabous de Buzon-Cantera a l'avantage important de résoudre le problème en moins d'une journée, alors que la planification manuelle occupe un médecin à temps partiel durant deux semaines.

4.2.1.7 Ambulances et ambulanciers paramédicaux

On retrouve peu d'articles dans la littérature qui étudient des problèmes de « *ambulance scheduling* ». Généralement, ceux-ci étudient des problèmes touchant plutôt aux véhicules qu'au problème de planification des ressources, tel des problèmes de localisation de véhicules sur le territoire. Le Tableau 4.5 présente un exemple de ces travaux.

Tableau 4.5 Exemples des méthodes d'optimisation dans les SPU

Référence	Domaine	Problème	Méthode d'optimisation
(Karakatic et Podgorelec, 2015)	Gestion des véhicules	Optimisation des problèmes de tournées de véhicules	Algorithmes génétiques
(Wilson <i>et al.</i> , 2013)	Gestion du personnel	Un modèle combinatoire multi-objectif de traitement des blessés en situation d'incident majeur	Heuristique constructive
(Schmid, 2012)	Gestion des véhicules	Relocalisation et répartition dynamique des ambulances	Programmation dynamique approximative
(Talarico <i>et al.</i> , 2015)	Gestion des véhicules	Routage en cas de catastrophe avec groupes de patients	Approche métaheuristique
(Billhardt <i>et al.</i> , 2014)	Gestion des véhicules	Allocation des ambulances aux patients.	Algorithme d'optimisation de Bertsekas
(Ibri <i>et al.</i> , 2012)	Gestion des véhicules	Une approche distribuée et décentralisée basée sur SMA en temps réel d'allocation de véhicule d'urgence	« <i>Parallel ant</i> »- Recherche tabou
(Gabdulkhakova et König-Ries, 2011)	Gestion des véhicules	Allocation rationnelle des ressources dans les situations d'urgence	Algorithmes heuristiques
(Soto <i>et al.</i> , 2013)	Gestion du personnel	Répartition des infirmiers et des ambulanciers paramédicaux	Programmation par contraintes
(Livingston <i>et al.</i> , 2010)	Gestion de la demande	Détermination des besoins des unités de services médicaux d'urgence	Score de probabilité des interventions préhospitalières.

À notre connaissance, peu d'articles discutant spécifiquement de planification de personnel ambulancier, parmi eux se trouve l'exemple typique d'Ernest *et al.* (1999). Le problème

analysé par Ernest nécessite une solution produisant les horaires des ambulanciers pour une seule station. Un seul quart est attribué par employé pour chaque journée. Les quarts de travail possibles sont définis préalablement et sont les suivants :

- D : Quart de jour de 8h à 18h (durée de 10 heures),
- N : Quart de nuit de 18h à 8h (durée de 14 heures),
- O : Journée de congé,
- L : Journée de vacance ou autre absence,
- F : Quart occupé par des tâches de gestion (donc non disponible au service ambulancier).

Le problème étudié par Ernest ne s'occupe pas seulement des quarts travaillés et des congés, mais aussi des vacances, autres absences et autres tâches. C'est donc un modèle de planification complet qui a l'avantage de pouvoir être directement utilisé pour la gestion des ressources humaines des ambulanciers. Le modèle fait aussi la différence entre les qualifications des employés, soit ambulancier paramédical et chef d'équipe. Il est donc possible d'assembler les équipes de façon à optimiser la répartition des compétences (en associant toujours un ambulancier paramédical avec un ambulancier par exemple). De plus, le modèle construit les horaires à partir de suites de quarts plutôt qu'à partir de quarts individuels. Il existe aussi une suite L (vacances) qui dure 28 jours consécutifs. L'horizon de planification dure 48 semaines, et l'horaire créé est un horaire cyclique dans lequel les suites de quarts sont insérées selon certaines règles. Par exemple, une de ces règles contraint une suite de travail à être suivie d'une suite de congé et une autre contraint l'horizon à contenir exactement 2 suites de vacances. À ces règles s'ajoutent les contraintes de respect de la demande. L'algorithme utilisé pour résoudre le problème est une heuristique. Bien que les auteurs ne qualifient pas l'algorithme de méthode de recherche avec tabous, ceux-ci utilisent des principes qui s'apparentent à une liste taboue dans l'algorithme. La solution initiale construit des blocs de plusieurs suites de quarts qui sont séparés par des blocs de vacances (L). L'heuristique sélectionne les blocs de suites de quarts et applique un algorithme du plus court chemin sur un réseau construit à partir des différentes solutions possibles à l'intérieur de ce bloc. L'ordonnancement externe des blocs de suites de quarts et des blocs de vacances

n'est donc jamais modifié. Les listes taboues sont appliquées sur les blocs de suites de quarts, de façon à ce qu'un même bloc ne soit pas constamment modifié.

En conclusion, la planification des horaires des ambulanciers paramédicaux est une opération longue et fastidieuse. Elle se compose de plusieurs phases. Elle exige certains ajustements mensuels et quotidiens de façon continue afin de tenir compte des congés de dernière minute, des retours au travail imprévus ou des événements sporadiques affectant la demande de services (festivals, conditions climatiques, manifestation, *etc.*). Cette planification peut être réalisée en combinant plusieurs modules de gestion de confection d'horaires, de gestion des absences et des congés, de gestion des quarts ponctuels et des modules d'attribution des quarts à la pièce.

4.2.1.8 Conclusion sur les différentes applications

On remarque que les problématiques de planification de personnel peuvent être grossièrement divisées en deux sections. Celles où la seule préoccupation est la gestion du temps (personnel infirmier, médecins, personnel au sol de compagnies aériennes, services de sécurité), et celles où il faut en plus se préoccuper implicitement des tâches et du matériel nécessaire (transport en commun, personnel de vol). On peut aussi remarquer que certains problèmes se concentrent sur la minimisation des coûts (personnel de vol, transport en commun) alors que d'autres se concentrent presque uniquement sur le bien-être des employés (médecins). Un point intéressant de la problématique des ambulanciers paramédicaux est qu'elle semble se trouver à cheval entre toutes ces définitions. Les coûts sont importants, mais le bien-être et les préférences des employés le sont autant. On retrouvera donc aussi bien des contraintes dures que des contraintes souples.

De plus, sans être aussi limitatives que pour le transport en commun ou le personnel de vol, plusieurs contraintes liées à la gestion des véhicules doivent être prises en compte. Par contre, les assignations précises de personnel à un véhicule en particulier ne sont pas à prendre en compte. Il faudra donc faire des compromis à plusieurs niveaux et ceux-ci auront un impact sur le choix et sur la qualité de la méthode de résolution.

4.2.2 Les différentes méthodes de résolution

La technique d'optimisation est l'outil qui permet la résolution d'un certain problème modélisé. Plusieurs catégories de méthodes d'optimisation existent et chacune d'entre elles a ses avantages et ses inconvénients. Il est donc important de passer les plus éprouvées en revue afin de pouvoir faire un choix éclairé sur une méthode adéquate pour résoudre notre problème. La programmation par contraintes sera vue en premier, suivie par la programmation mathématique pour laquelle les distinctions entre ses différentes branches les plus importantes seront exposées, puis les heuristiques gloutonnes, suivies des méta-heuristiques, puis des hyper-heuristiques et finalement des méthodes hybrides.

4.2.2.1 La programmation par contraintes

La programmation par contrainte découle plutôt de l'informatique que de la recherche opérationnelle. À la différence des techniques de recherche opérationnelle dont l'objectif est généralement d'optimiser un problème en respectant les contraintes, la programmation par contraintes a plutôt comme objectif de répondre à toutes les contraintes sans se soucier de l'optimalité de la solution. Certaines approches hybrides entre optimisation et programmation par contraintes ont toutefois été développées afin de profiter de la grande capacité de celle-ci à gérer des contraintes complexes, tout en s'assurant d'obtenir une solution la plus optimale possible. La programmation par contraintes semble susciter un intérêt non négligeable. Selon le laboratoire Quosséca (2013), cette méthode jouit d'une utilisation grandissante dans l'industrie pour la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire, ce qui inclut les problèmes de planification et de confection d'horaires. Malheureusement, c'est une approche qui ne semble pas être très efficace pour gérer les contraintes souples, ce qui la rend moins intéressante pour résoudre notre problème de planification des SPU, mais qu'on l'a intégrée dans notre module de génération des cycles de travail des ambulanciers paramédicaux.

4.2.2.2 La programmation mathématique

Les méthodes de programmation mathématique sont nées en même temps que la recherche opérationnelle et sont encore largement utilisées de nos jours. Il en existe plusieurs variantes.

Celles qui seront vues ici sont celles que nous avons jugées les plus adéquates pour les problèmes de planification. Ce sont la programmation en nombres mixtes ainsi que les méthodes de décomposition (incluant la génération de colonnes).

La programmation linéaire est basée sur l'algorithme du simplexe qui a été développé par Dantzig (2002) en 1947. Cette méthode permet d'aller chercher la solution optimale d'un problème exprimé en terme d'une fonction-objectif que l'on cherche soit à maximiser, soit à minimiser, soumise à une ou plusieurs contraintes de type « plus grand ou égal » ou « plus petit ou égal » dans lesquelles on retrouve les variables du problème à gauche du symbole d'inégalité, et une valeur numérique à droite. L'avantage principal de cette méthode est que la solution obtenue est optimale si on dispose de suffisamment de temps pour résoudre le problème complètement. Toutefois, cette méthode a des limites entre autres au niveau de sa capacité à prendre en compte des contraintes réelles. En effet, un grand nombre de facteurs réels ne peuvent être mis sous une forme linéaire, et il faut donc soit simplifier le problème, soit faire preuve d'une très grande créativité en utilisant un grand nombre de variables. Cette situation peut compliquer considérablement la résolution du problème. Avec le simplexe, le temps de résolution dépend directement du nombre de variables et du nombre de contraintes qui définissent ensemble l'espace des solutions à explorer. Les problèmes de grande taille modélisés de façon à obtenir une solution applicable dans un contexte réel peuvent demander plusieurs heures voir même plusieurs jours de temps de résolution avant d'obtenir la solution optimale. C'est donc une méthode qui peut être bien adaptée à des problèmes d'envergure stratégique, mais qui est moins bien adaptée à des problèmes opérationnels où la rapidité d'obtention d'une solution réalisable est toujours un critère de performance important.

L'utilisation de cette méthode se complexifie lorsqu'il est nécessaire d'obtenir des solutions en nombres entiers. Dans le cas de la planification du personnel par exemple, il serait inacceptable d'attribuer une fraction de quart de travail à un employé ou un quart de travail à une fraction d'employé.

Il est évident que dans le monde réel où les entités sont faites de matière et non de nombres, une telle solution serait irréalisable. Dans de tels cas, il est nécessaire d'obtenir une solution en nombres entiers. Il est toutefois très peu probable que la solution optimale d'un certain

programme linéaire soit entièrement en nombres entiers seulement suite à une résolution par le simplexe étant donné que le simplexe ne peut évaluer des solutions que sur un espace continu, contenant donc des nombres réels. Des algorithmes ont donc été développés pour accompagner le simplexe durant la résolution du problème afin d'obtenir une solution en nombres entiers. Le plus connu de ces algorithmes est celui de séparation et d'évaluation progressive « *branch and bound* » développé par Land et Doig (1960).

Dans les problèmes de planification, on ne rencontre jamais de méthode de résolution n'utilisant que le simplexe étant donné que plusieurs variables doivent être des nombres entiers. On retrouve donc généralement des problèmes de programmation en nombres entiers, ou parfois des problèmes mixtes, c'est à dire contenant certaines variables entières et certaines variables continues. On retrouve de ces méthodes à travers à peu près tous les types d'applications de planification et leur importance plus stratégique qu'opérationnelle permet et justifie donc le temps supplémentaire de résolution.

4.2.2.3 Méthodes de décomposition et génération de colonnes

La génération de colonnes est la méthode de décomposition développée par Dantzig et Wolf (1960). Malgré son âge, elle est de nos jours une méthode préminente pour s'occuper de problèmes ayant un très grand nombre de variables (Gendron *et al.*, 2013). Ces problèmes sont d'ailleurs fréquents en planification. Le principe de la génération de colonnes est le suivant : afin de diminuer la taille du problème et ainsi accélérer sa résolution, le problème initial est décomposé en un problème maître restreint (PMR), dans lequel seul un sous-ensemble « restreint » des variables du problème apparaissent explicitement ainsi qu'en un sous problème qui a pour but de générer au fur et à mesure de la résolution les variables absentes du PMR susceptibles d'en améliorer la solution. Le sous problème est construit en fonction des coûts marginaux des contraintes obtenus par la résolution du PMR à l'itération présente. Suite à la reformulation du PMR, une nouvelle variable qui améliore le plus la solution actuelle y est envoyée. Cette nouvelle variable correspond à l'ajout d'une nouvelle colonne dans la formulation du PMR, d'où le nom de génération de colonnes. Ce cycle est répété jusqu'à l'obtention de la solution optimale.

Malgré son efficacité et sa compatibilité pour les problèmes de confection d'horaires, ce n'est pas la méthode de résolution la plus populaire. C'est possiblement à cause de sa complexité d'implémentation. Elle a toutefois plusieurs avantages en comparaison avec un algorithme de programmation en nombres entiers basé sur le simplexe et sur de la séparation et évaluation progressive (expliqué précédemment), parmi lesquels un temps de résolution plus court lorsque le problème est bien modélisé. Obtenir une solution finale en nombres entiers seulement ne se fait pas plus facilement ici qu'avec le simplexe. Pour obtenir une valeur optimale entière pour certaines variables, il faut utiliser dans ce cas-ci du « *branch and price* », l'équivalent d'un algorithme de séparation et d'évaluation progressive à l'intérieur duquel est exécuté un algorithme de génération de colonne à chaque nœud. Cela peut rendre la résolution très longue, d'où la raison pour laquelle cette technique est généralement employée pour des résolutions de problèmes de nature plus stratégique. L'autre méthode très connue de décomposition est l'algorithme de *Benders*. On ne semble toutefois pas le retrouver fréquemment en planification.

4.2.2.4 Les heuristiques gloutonnes

Contrairement aux méthodes de programmation mathématique, les heuristiques ne garantissent pas d'obtenir la solution optimale. Ce sont en revanche des méthodes beaucoup plus rapides et donc mieux adaptées à des situations où un résultat est nécessaire dans un court laps de temps. Les heuristiques gloutonnes sont les versions les plus simples des heuristiques. Ces méthodes sont caractérisées par le fait qu'elles arrêtent et bloquent au premier optimum local rencontré. Un optimum local est l'optimum d'une certaine région de l'espace des solutions d'un problème, mais pas nécessairement de l'espace des solutions dans son ensemble. L'optimum global est la meilleure valeur de l'espace des solutions dans son ensemble. Un optimum global est donc aussi un optimum local, mais un optimum local n'est pas forcément un optimum global. Parmi les heuristiques gloutonnes, on peut faire la distinction entre deux types de méthodes : les méthodes constructives et les méthodes d'amélioration.

Les méthodes constructives génèrent une solution à partir d'une situation donnée. Cette situation peut être un espace vide ou une section de solution qui existe déjà. Les méthodes

d'améliorations quant à elles utilisent la solution obtenue par la méthode constructive et y effectuent des améliorations le plus souvent en effectuant des échanges entre différentes sections de la solution. Les méthodes d'améliorations sont aussi appelées méthodes de post optimisation. Avec ces méthodes, il est difficile de s'assurer d'avoir de bons résultats sur chaque instance et elles ne sont d'ailleurs plus utilisées fréquemment dans les articles récents, sauf dans le cas des plus sophistiquées. La méthode du plus proche voisin est un des exemples les plus basiques d'une heuristique gloutonne constructive. Il s'agit ici d'ajouter de façon séquentielle à chaque itération l'élément qui fait augmenter le moins le coût dans un contexte de minimisation, et inversement dans un contexte de maximisation. Ce genre d'approche fournit généralement de bonnes sections de solution au début de la résolution mais des moins bonnes vers la fin. La méthode d'insertion est une autre heuristique constructive de base relativement simple : ici on insère à chaque itération un nouvel élément à l'emplacement qui fait le moins augmenter le coût, dans un contexte de minimisation encore une fois, et l'inverse dans un contexte de maximisation. Cette dernière offre des solutions déjà bien meilleures en général que le plus proche voisin. On retrouve une grande variété d'heuristiques constructives bien plus complexes, telle la génération de pétales pour des tournées de véhicules, qui ne seront pas discutées ici puisqu'elles s'adaptent plus difficilement à la planification du personnel et/ou parce qu'elles ne sont pas très intéressantes à prendre en compte puisqu'elles fournissent des solutions moins intéressantes que les autres types de méthodes. Quant aux méthodes d'amélioration, les plus souvent utilisées sont « *r-opt* » développée par Lin (1965) et « *Or-opt* » développée par Or (1976). « *R-opt* » sélectionne toutes les combinaisons de « *r* » éléments de la solution et implémente le meilleur échange possible. « *Or-opt* » quant à elle sélectionne toutes les suites de 3 éléments qu'elle déplace au meilleur emplacement, puis fait de même avec les suites de 2 et de 1 éléments.

4.2.2.5 Les méta-heuristiques

Les méta-heuristiques sont, au même titre que les heuristiques gloutonnes, des méthodes qui ne garantissent pas de rencontrer l'optimum. Les méta-heuristiques sont toutefois généralement des méthodes plus performantes que les heuristiques gloutonnes. En effet, celles-ci sont équipées de dispositifs leur permettant de sortir d'optimums locaux afin de

pousser les recherches plus loin dans l'espace de solutions. Bien sûr, cela a pour conséquence de rallonger le laps de temps nécessaire pour obtenir la solution finale en comparaison avec une heuristique gloutonne, mais elles sont cependant plus rapides que les méthodes de programmation mathématique. Il existe différentes méta-heuristiques parmi lesquelles trois sont dominantes dans la littérature : Le recuit simulé, les algorithmes génétiques et la recherche avec liste de tabous.

La méthode du recuit simulé (RS) est la première méta-heuristique à avoir été développée. C'est en fait une méthode inspirée du recuit thermodynamique des métaux, développée par Metropolis *et al.* (1953). Elle a été redécouverte par Gellat *et al.* (1983) en 1983. Avec cette analogie avec la fonte des métaux, la technique employée par le RS pour sortir d'un optimum local est un paramètre de température. Avec le métal, plus la température est chaude, plus les particules peuvent se déplacer librement à travers le métal chaud. De la même façon dans la méthode, plus le paramètre de température est élevé, plus le domaine des solutions explorables est grand et plus il est donc facile de sortir d'un optimum local. Le paramètre de température est diminué pour éventuellement atteindre « 0 » degrés, ce qui est généralement le critère d'arrêt de la méthode.

Les algorithmes génétiques (AG) ont quant à eux été proposés par Holland (1975). Ils sont basés sur l'analogie avec, comme le nom l'indique, l'évolution des espèces. Même si techniquement ce sont des algorithmes parfois difficiles à implanter, conceptuellement leur fonctionnement est simple : on choisit à chaque itération deux solutions ou plus, évaluées comme étant bonnes afin de servir de parents et on crée une ou plusieurs solutions dérivées en combinant certains éléments de chacune des deux solutions parentes. À cela se rajoute un facteur aléatoire de mutation, souvent avec une probabilité très faible de l'ordre de 1 sur 100 ou 1 sur 1000 itérations. La difficulté d'implanter ces algorithmes se retrouve généralement dans le codage de solution sous forme de génome de façon à pouvoir faire la combinaison créant la solution dérivée. La philosophie derrière ces algorithmes est la généralité et la flexibilité permettant à l'algorithme d'être appliqué à une large gamme de problèmes. On se retrouve donc fréquemment avec des méthodes qui ne sont pas en mesure de profiter

pleinement d'une structure particulière d'un certain problème, voulant sacrifier cet aspect au profit d'une plus grande flexibilité.

Finalement, on retrouve la recherche avec liste de RT qui est, relativement, une des plus récentes méta-heuristiques et qui semble avoir gagné en popularité durant les dernières années. Elle a été développée par Glover (1986) et indépendamment par Hansen (1986). Contrairement aux AG ou RS qui font appel à des éléments probabilistes, la RT fait appel à la notion de mémoire. Elle s'inspire de l'intelligence artificielle en gardant trace du cheminement passé pour influencer le cheminement futur. Ce cheminement passé est conservé en mémoire grâce à une liste de tabous. Cet item est une liste conservant un certain nombre d'opérations et/ou de solutions déjà explorées dernièrement, et qui les interdit durant tout le temps où celles-ci sont présentes sur la liste. L'objectif de cette liste est d'empêcher l'algorithme de cycler et de permettre l'exploration de zones de l'espace des solutions n'ayant pas encore été explorées. C'est à travers le concept de voisinage que la RT peut passer d'une solution à une autre.

La notion de voisinage définit simplement l'opération permettant de passer d'une solution présente à une nouvelle solution. La recherche avec tabous a prouvé son efficacité à travers un large éventail de différents problèmes. Il est d'ailleurs surprenant qu'on ne recense que 16 articles utilisant la recherche avec tabous en planification du personnel dans Ernest *et al.* (2004a), celle-ci arrivant donc derrière le recuit simulé et les algorithmes génétiques. Cela pourrait s'expliquer par la complexité et le temps nécessaire à la conception de la méthode. Parmi les autres méta-heuristiques, on retrouve entre autres les réseaux de neurones et les méthodes à voisinages variables. Ces méthodes se retrouvent toutefois bien moins souvent dans la littérature en planification du personnel. Il est important de noter que l'on retrouve de plus en plus d'hybridations de plusieurs méthodes qui incluent au moins une méta-heuristique. Peu importe le type d'heuristique, leur principal défaut repose sur le fait qu'elles sont majoritairement orientées sur l'environnement et manquent de flexibilité en cas de changements environnementaux (Kassa et Tizazu, 2013). En contrepartie, la qualité des solutions peut être excellente et le temps nécessaire à leur obtention peut être très court lorsque nécessaire.

4.2.2.6 Les hyper-heuristiques

Le concept d'hyper-heuristique est très récent. Il s'agit en fait d'une heuristique qui dispose à l'intérieur d'une variété d'heuristiques utilisables. L'objectif est d'avoir une méthode plus flexible pouvant résoudre une plus grande variété de problèmes qu'une simple heuristique ou méta-heuristique. Selon Burke *et al.* (2003), alors qu'une méta-heuristique s'occupe de trouver des solutions, une hyper-heuristique s'occupe plutôt de trouver les méthodes pour trouver les solutions. Toujours selon Burke *et al.* (2003), il existe deux types d'hyper-heuristiques. Premièrement, on retrouve celles qui procèdent de façon intelligente, c'est-à-dire à l'aide d'un mécanisme d'apprentissage qui permet à la méthode d'apprendre quel est le meilleur algorithme à employer pour un certain problème et/ou type de problème, et ensuite de s'en rappeler pour les opérations ultérieures.

Deuxièmement, on retrouve d'autres hyper-heuristiques moins évoluées qui fonctionnent de façon aléatoire en conservant à la fin le meilleur résultat trouvé parmi tous les essais. Ces méthodes sont très récentes et encore très peu utilisées maintenant. Elles ne sont donc pas encore très bien documentées, et les études comparatives avec les autres méthodes sont rares. Il est donc difficile d'évaluer leur potentiel.

4.2.2.7 Les méthodes hybrides

Une méthode hybride est simplement une méthode qui intègre plusieurs différentes méthodes de résolution pour résoudre un seul problème. Cela permet de profiter de la puissance de chaque méthode en l'utilisant pour résoudre la section du problème pour laquelle elle est la mieux adaptée (Chu *et al.*, 2014).

4.3 État de l'art des systèmes multi-agents

Dans les parties précédentes, on a montré l'importance et l'utilité des méthodes de modélisation et d'optimisation dans le secteur de la santé. Elles donnent la possibilité de développer des systèmes performants et efficaces visant à augmenter la productivité et à améliorer la gestion et la qualité des soins offerts. L'adaptation et l'intégration des techniques scientifiques issues du domaine du génie industriel au domaine des SPU constituent une

bonne approche malgré les différents des deux mondes sur de nombreux éléments critiques. Nous ne parlons pas de produits et de machines, mais de patients, d'ambulanciers paramédicaux et d'ambulances.

Les avantages des systèmes multi-agents (SMA) comme outil de modélisation des systèmes de production de soins sont cités dans plusieurs travaux. A titre d'exemple, on mentionne les travaux de Paulussen et Jennings (2003), Daknou *et al.* (2008) et Laleci *et al.* (2008). C'est la qualité descriptive des SMA qui les rend si répandus pour le secteur de la santé où le besoin d'avoir des moyens et des outils facilitant la communication et l'interaction (entre les disciplines et personnel) est très fort. Dans la partie suivante, nous présentons un état de l'art sur les systèmes multi-agents et leur application dans le domaine de la santé.

4.3.1 Introduction aux systèmes multi-agents

Les agents autonomes et les SMA représentent une nouvelle façon d'analyser, de concevoir et d'implanter des systèmes informatiques complexes. Les agents sont utilisés dans une variété d'applications sans cesse croissante. Avant d'aborder ce sujet, il est important de définir les termes « agents », « systèmes à base d'agents » et « systèmes multi-agents ». Une recherche des définitions de ces termes dans la littérature nous montre qu'elles sont relativement différentes selon les auteurs. Nous avons choisi une définition qui, selon nous, est la plus acceptée par les spécialistes du domaine. Cependant, les domaines d'application concernés par les SMA s'étendent de plus en plus. Pour certains auteurs (et sans entrer dans ce débat), il s'agit bien d'une nouvelle phase de modélisation des systèmes suivant celle du paradigme objet.

Les SMA sont des systèmes informatiques distribués issus du domaine de l'intelligence artificielle distribuée (IAD). Ils se composent d'un ensemble d'entités informatiques « autonomes » et « intelligentes » qui interagissent entre elles. Dans les paragraphes suivants, nous décrivons les concepts et les possibilités qui découlent du domaine de recherche que constituent les systèmes multi-agents. Nous présentons un état d'évolution des travaux de recherche effectués dans ce domaine.

Les systèmes basés sur le paradigme multi-agents servent à représenter des propriétés et comportements radicaux, tels que la réification de la notion d'émergence, le comportement non linéaire et la propriété de reproduction autocontrôlée d'un groupe ou ensemble d'agents (Zhang *et al.*, 2014). La conception d'applications informatiques du génie logiciel relève aujourd'hui d'une démarche basée sur une approche orientée objets dont on peut énumérer plusieurs méthodes et langages « objets » telles que UML (Roques et Vallée, 2007 ; Grunske *et al.*, 2012). Ils utilisent le concept objet comme entité de base de la modélisation. L'approche de modélisation « objets » est fondée sur un principe qui restreint le domaine des systèmes que l'on y modélise. Fonctionnellement, le système dans l'approche objet est considéré bien décomposable.

À ce niveau, l'agentification, qui représente la transition de la modélisation « objet » vers une modélisation « agent », pose un grand problème. Pour la programmation orientée agent (POA), Shoham (1993) propose un langage de POA de la même façon qu'il y a des langages de programmation orientée objet (POO). Il permet de programmer des agents en utilisant des éléments de haut niveau tels que des buts, des choix, des compétences, des croyances, *etc.* L'échange des différents types de messages entre ces agents repose aussi sur un mécanisme de communication de haut niveau, comme les messages d'information, de requête, d'offre, de promesse, de refus, d'acceptation, *etc.* Ces efforts ne permettent pas encore de disposer de langages de POA semblables aux langages de POO comme Java, C++ ou C#.

4.3.2 Notions et définitions

4.3.2.1 L'agent



[illegible]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] afin de désigner, d'une part des agents indépendamment intelligents qui possèdent des croyances sur leur environnement. Ils peuvent planifier un ensemble d'actions pour réaliser leurs objectifs. D'autre part [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]
 [REDACTED]
 [REDACTED]
 [REDACTED]
 [REDACTED]
 [REDACTED] Si les objectifs [REDACTED]
 [REDACTED]

Tableau 4.6.

Tableau 4.6

À titre d'exemple, détaillons les agents réactifs. Si l'agent réagit seulement à des stimuli externes, qui proviennent de son environnement,

4.3.2.2 L'environnement

Dans les systèmes multi-agents, la notion d'environnement est primordiale et fondamentale. Généralement, la conception de cet environnement devance la conception des agents. En effet, la nature de l'environnement a beaucoup d'influence sur l'architecture des agents, précisément au niveau des effecteurs et des percepteurs. Norvig et Russel (2009)

- Déterminisme : Une action réalisée dans un contexte donné, d'un environnement déterministe, ne produira qu'un seul et même effet.
- Continuité : , on parle d'un environnement discret, continu sinon.

- Dynamisme : [REDACTED] ne peut pas changer sans les actions menées par les agents. Pourtant, un environnement dynamique change indépendamment des agents.

Les environnements inaccessibles, non-déterministes, dynamiques et continus constituent la catégorie [REDACTED]. Ils sont qualifiés d'environnements ouverts. L'architecture d'un agent sera d'autant plus complexe que l'environnement dans lequel il agit est lui-même complexe.

L'environnement, dans le contexte [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED] les composants de cet ensemble. De plus, l'environnement est généralement discret et toute portion de cet environnement considérée comme homogène est appelée alors cellule. L'exemple de cet environnement le plus illustratif est représenté sous forme d'une [REDACTED]
[REDACTED]

4.3.2.3 Communication entre agents

Une des caractéristiques importantes des agents et leur capacité à communiquer. La communication représente la forme la plus courante d'interaction dans les systèmes multi-agents. [REDACTED] (volontaire ou non) est défini comme étant [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

[REDACTED] est adressé à un destinataire unique, il s'agit d'une communication point à point et de diffusion dans le cas contraire. [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

[REDACTED] volontaire ou accidentel, voulu ou subis par l'émetteur.

Les agents doivent avoir des effecteurs qui leur permettent de manipuler des variables d’environnement. Il faut mentionner que l’intégration des notions comme la saturation peut changer la définition d’une variable d’environnement. [redacted]
[redacted] d’affichage permettent d’avoir une structure complexe des messages et sont alors [redacted]
[redacted] (*Knowledge Query and Manipulation Language*) ou ACL (*Agent Communication Language*), [redacted]
[redacted]
[redacted]

Tableau 4.7 [redacted]

[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]

4.3.2.4 Le système multi-agents

À ce niveau, on peut déterminer ce qu’est un SMA. Ainsi, les principales caractéristiques d’un SMA sont définies comme suit :

- Un groupe (E) [redacted] placées dans un [redacted] (V).
- Un groupe [redacted] \subseteq (E).
- Un [redacted] sous forme de [redacted]
[redacted].
- Un [redacted]

- Et enfin, une organisation qui permet de structurer l'ensemble des agents.

4.3.3 Processus de développement des SMA

Ce processus de développement illustré dans la Figure 4.4 se compose d'un ensemble d'étapes dont il y'a certaines similarités avec le processus de développement appliqué pour les systèmes orientés objets (SOO). Or, les deux processus se subdivisent en quatre phases (Daknou, 2011) et les trois premières sont quasiment semblables (Analyse, Conception, Développement). La différence principale réside dans la quatrième phase (Maintenance versus Déploiement).

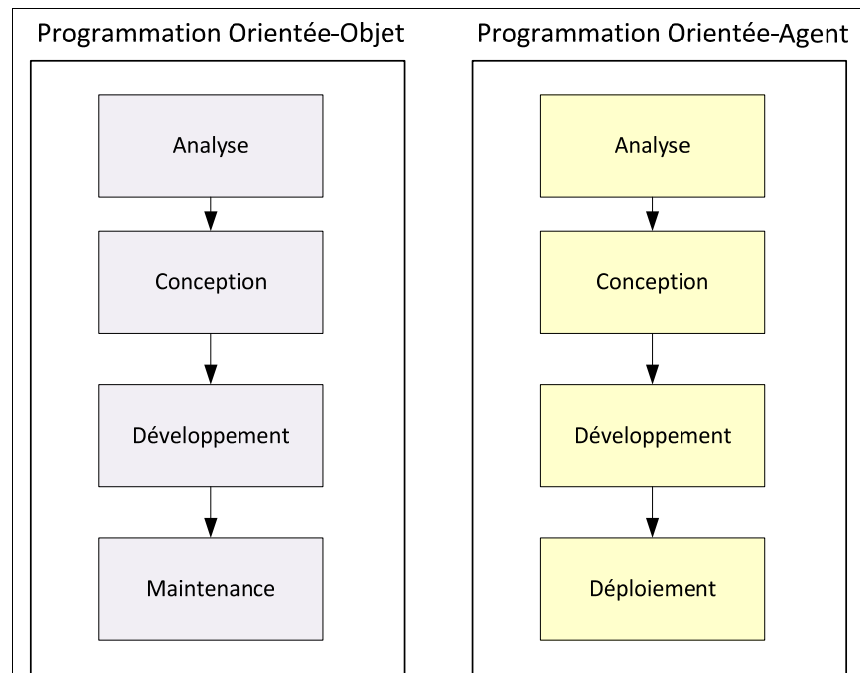


Figure 4.4 Processus de programmation des SOO et SMA

Néanmoins, dans un processus orienté objet cette phase correspond à celle de maintenance où on peut corriger les anomalies et intégrer les améliorations voulues par l'utilisateur. Dans les SMA, cette phase de maintenance est remplacée par la phase de déploiement. Tel que présenté et développé par Demazeau *et al.* (2011). Cette phase de déploiement est nécessaire dans la conception des SMA pour inclure l'évolution des agents durant l'exécution. Plus

précisément, il s'agit d'ajouter, modifier ou supprimer des agents durant le fonctionnement de l'application.

4.3.4 Les méthodologies SMA

La modélisation des SMA est actuellement un champ de recherche très ouvert. Quoique plusieurs méthodologies et approches ont été proposées, on n'a toujours pas fixé une méthode standard de développement malgré la multitude de travaux qui tentent de standardiser les méthodologies (Bernon *et al.*, 2005). Cependant, les travaux de classification et de comparaison des différentes méthodologies permettent ainsi au chercheur de choisir celle qui répond au mieux à son domaine de recherche. À titre d'exemple, on peut se référer aux travaux de Lahlouhi (2001), de Laichour (2002) et notamment les travaux de Mueller et Bauer (2004) qui présentent une classification selon plusieurs critères. On distingue principalement trois groupes illustrés dans la Figure 4.5.

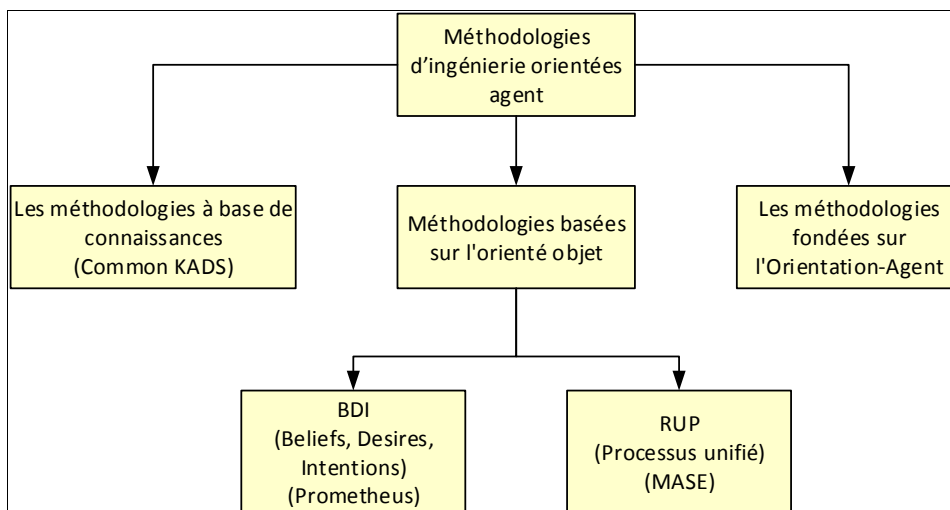


Figure 4.5 Classification des méthodologies multi-agents

- Méthodologies basées sur l'orienté objet : La tendance à élargir les techniques orientées objet est la caractéristique principale de ce type de méthodologie qui se subdivise en deux axes : BDI (*Beliefs, Desires, Intentions*) et RUP (Processus unifié). BDI repose sur les croyances, les désirs et les intentions. Parmi les méthodologies BDI, on peut citer MMTS (*Methodology and Modeling Technique for Systems of BDI*

agents) (Georgeff *et al.*, 1996) et *Prometheus* (Padgham et Winikoff, 2003). RUP (Kruchten, 2000) est une méthode générique, itérative et incrémentale de développement des logiciels orientés objets et plusieurs méthodologies y s'inscrivent. À titre d'exemple, on peut mentionner : *Multi-Agent Systems Engineering* (MASE) (DeLoach et Wood, 2001) et *Organization-based Multiagent System Engineering* (O-MaSE) (DeLoach, 2005).

- Les méthodologies à base de connaissances : La puissance de ce type de méthodologie réside dans la modélisation de l'état mental des agents. Mais elle n'offre pas une modélisation des comportements sociaux des agents. La référence dans ce domaine est la méthodologie *Common KADS* (Shreiber *et al.*, 1994).
- Les méthodologies basées sur l'Orientation Agent : L'abstraction du niveau social est la caractéristique principale de ce type de méthodologie (Barrera *et al.*, 2011).

4.3.5 Domaine d'application des systèmes multi-agents

Les SMA étant dérivé de l'IAD permettent de modéliser des systèmes où la modélisation classique s'avère inappropriée ou le système étudié est naturellement distribué. Les problèmes qui ne sont pas distribués naturellement peuvent l'être pour des raisons de simplification.

C'est la responsabilité de l'analyste de chercher les solutions de distribution qui correspondent le plus au problème étudié. Les systèmes naturellement distribués sont souvent originaires du monde réel. On note à titre d'exemple les systèmes de simulation d'écosystèmes dont chaque individu est associé à un agent (Xuemei *et al.*, 2012 ; Lopardo *et al.*, 2011 ; Corral et Calegari, 2011 ; Feng *et al.*, 2012 ; Pereira *et al.*, 2012). Le Tableau 4.8 présente un exemple des champs d'application des SMA.

Tableau 4.8 Domaines d'application des SMA

Domaine	Détails
---------	---------

d'application	
<div data-bbox="164 342 358 373"></div> <div data-bbox="164 394 261 426"></div> <div data-bbox="164 447 272 478"></div> <div data-bbox="164 499 245 531"></div>	<div data-bbox="386 342 1320 373"></div> <div data-bbox="386 394 1320 877"> <p>les résultats globaux les éléments éléments représentent à titre d'exemple dans un écosystème, voitures, des individus indépendants. Dans un modèle orienté-individu, on peut continuellement suivre les propriétés de chaque individu. Dans ces modèles, un agent (individu) représente un élément être-humain, un animal, etc. (Vincenota <i>et al.</i>, 2011 ; Roughgarden, 2012 ; Zhang <i>et al.</i>, 2012</p> </div>
<div data-bbox="164 898 272 930"></div> <div data-bbox="164 951 289 982"></div>	<div data-bbox="386 898 1320 930"></div> <div data-bbox="386 951 1320 982"></div> <div data-bbox="386 1003 1320 1035"></div> <div data-bbox="386 1056 1320 1381"> <p>Quelquefois, tous les facteurs qui interviennent lors de la modélisation. L'approche multi-agents offre la possibilité de recourir règles compris cette modélisation permet d'avoir un système ayant les caractéristiques voulues. principalement qui permettent</p> </div>
<div data-bbox="164 1402 358 1434"></div> <div data-bbox="164 1455 358 1486"></div> <div data-bbox="164 1507 358 1539"></div> <div data-bbox="164 1560 228 1591"></div>	<div data-bbox="386 1402 1320 1934"> <p>Ces systèmes</p> <p>adéquatement. Les SMA se proposent comme étant bien convenables pour traiter des données qui peuvent provenir sous des formats différents et de diverses sources.</p> </div>

	qui constitue un champ d'utilisation des systèmes multi-agents (Krzywicki <i>et al.</i> , 2014).
<div></div> <div></div> <div></div>	<p>Ces systèmes dans le domaine <div></div></p> <p><div></div> des traitements offerts aux patients et la performance du personnel. Ils permettent d'augmenter rigoureusement le respect de la réglementation et de la protection du personnel soignant des risques de procédés. Ils peuvent <div></div></p> <p><div></div>. Les caractéristiques <div></div></p> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div>

:

- Les travaux de l'équipe de González-Vélez *et al.* (2009) dans le cadre du projet de recherche européen *HealthAgents* vise à développer un système d'aide à la décision à base d'agents distribués pour le diagnostic et le pronostic des tumeurs cérébrales. Ce système met en œuvre de nouvelles méthodes de discrimination fondée sur la reconnaissance de formes, afin d'analyser la spectroscopie par résonance magnétique (MRS) et les données ADN. Ce travail documente le premier prototype de la DSS (*Decision Support System*), basé sur une architecture multi-agents, associée à une ontologie, du datamining et des protocoles d'échange de données cliniques. Il est conçu pour permettre aux utilisateurs de préserver leurs politiques de partage de l'information, tout en leur permettant de bénéficier de l'utilisation d'un entrepôt de données distribuées. En outre, il permet la conception de classificateurs locaux ciblant les populations de patients spécifiques. Les caractéristiques de ce système sont :
 - Domaine : Diagnostic et pronostic des tumeurs au cerveau, aide à la décision.
 - Objectif : Fournir une nouvelle approche liée aux tumeurs du cerveau par l'introduction des techniques analytiques, telles que MRS.
 - Cible : Hôpitaux européens.

- Agents : Agents de base de données, agents de prétraitement, agents de l'interface GUI, agents pages jaunes, agents classificateurs-constructeurs, agents de classificateurs, agents pétitionnaire, agents de service de recherche fondée sur des preuves.
 - Type d'architecture : Architecture distribuée, *HealthAgents* (se fonde sur trois domaines d'expertise : La détermination des propriétés tumorales, l'apprentissage automatique, les agents et ontologies).
 - Méthodologie : Utilisation d'un ensemble de méthodes de reconnaissance de formes pour le diagnostic et le pronostic des tumeurs cérébrales.
 - Mode de communication : La couche Agent du modèle est en charge de toutes les communications et permet leur abstraction du reste du système offrant une plus grande flexibilité.
 - Résultat : Système d'aide à la décision à base d'agents distribués pour le diagnostic et le pronostic des tumeurs cérébrales.
 - Méthode d'optimisation : Non spécifiée
- Sanchez *et al.* (2010) présentent une revue de la littérature (2002 à 2008) concernant les applications à base d'agents dans le domaine de la santé, recueillies dans les bases de données médicales et des conférences internationales. Dans cette revue 15 systèmes à base d'agents ont été sélectionnés selon un ensemble de critères définis par les auteurs. Leurs architectures internes ainsi que leurs techniques de coordination basées sur la communication étaient examinées. Un classement compte tenu de l'objectif principal des systèmes a été fait. Pour chaque catégorie, une discussion sur la pertinence de la technologie de l'agent dans la résolution des problèmes étudiés est présentée. Les caractéristiques de cette application sont :
 - Domaine : Différents domaines de la santé : gestion des données médicales, systèmes d'aide à la décision, allocation et planification des ressources, soins à distance, systèmes mixtes.
 - Objectif : Étudier la valeur ajoutée et les aspects positifs des SMA dans le domaine de la santé par rapports aux approches classiques (163 articles étudiés) :

modularité, efficacité, décentralisation, flexibilité, personnalisation, planification et ressources partagées, suivi et gestion des alarmes, proactivité, sécurité, *etc.*

- Cible : Chercheurs.
 - Agents : Différents types d'agent : asynchrone, autonome, proactif.
 - Type d'architecture : Plusieurs architectures : distribuées, décentralisées, dynamiques.
 - Méthodologie : Selon le cas étudié.
 - Mode de communication : Différents modes de communication : négociation, diffusion, signal, XML-message.
 - Résultat : Les SMA proposent plusieurs solutions pour les problèmes de limitation des ressources, de performance, *etc.*
 - Méthode d'optimisation : Par le biais de l'optimisation des processus administratifs et de supports (gain économique et du temps).
- Baskaranc *et al.* (2011) ont discuté d'un environnement de test des applications à base d'agents virtuels. Ce cadre est capable de s'adapter à diverses techniques de tests distincts et peut accueillir de nombreux produits. Il est composé de plusieurs couches (couche réactive, couche de communication, et couche délibérative) et d'un ensemble d'algorithmes (algorithme de négociation, algorithme d'inscription, algorithme d'allocation). Ce cadre de tests de logiciels à base de système multi-agents décrit dans cet article, est une version améliorée du cadre proposé dans les travaux de recherche de Dhavachelvan et Uma (2005) et Dhavachelvan *et al.* (2006). Le cadre est capable de s'adapter à diverses techniques d'essais distincts et peut accueillir aussi de nombreux produits qui peuvent être définis en termes d'agents spécifiques. Les caractéristiques principales de ce cadre (*Framework*) sont :
 - Domaine : Bio-informatique.
 - Objectif : Améliorer la performance du processus de test. Valider le cadre de tests des systèmes multi-agents dans des conditions régulières et exceptionnelles.
 - Cible : Analystes, architectes et développeur des systèmes multi-agents.
 - Agents : Variétés d'agents : Agent coopératif, agent coordinateur, *etc.*

- Type d'architecture : Architecture distribuée, paradigme de la lettre et l'enveloppe.
 - Méthodologie : Une perspective régulière et une perspective exceptionnelle.
 - Mode de communication : Couche de communication basée sur des modèles compétitifs et coopératifs qui utilisent les algorithmes de négociation et d'allocation.
 - Résultat : Cadre de test et de validation des SMA.
 - Méthode d'optimisation : Ensemble d'algorithmes.
- Les travaux de Tapia *et al.* (2010) présentent une intelligence ambiante à base de système multi-agents visant à améliorer l'assistance et les soins de santé pour les patients Alzheimer. Le système proposé fait appel à plusieurs technologies sensibles au contexte qui lui permettent d'obtenir automatiquement les informations des utilisateurs et de l'environnement uniformément répartie, en mettant l'accent sur les caractéristiques de l'ubiquité, la conscience, l'intelligence, la mobilité, *etc.*, qui sont tous des concepts définis par l'intelligence ambiante. Le système utilise une architecture multi-agents orientée services appelée utilisateur flexible afin de mieux répartir les ressources et d'améliorer la performance. Il est démontré qu'une approche SOA (*Service Oriented Architecture*) est adéquate pour construire des systèmes multi-agents distribués et très dynamiques. L'intelligence ambiante (AMI) est un domaine multidisciplinaire émergente fondée sur l'informatique ubiquitaire, qui influence la conception de protocoles, les communications, les systèmes, les dispositifs, *etc.*, proposant de nouvelles formes d'interaction entre les gens et la technologie tout en les adaptant aux besoins des individus et leur environnement. Les caractéristiques de ce système sont :
 - Domaine : Patients d'Alzheimer.
 - Objectif : Développement d'un SMA, basé sur l'intelligence ambiante, destiné aux patients d'Alzheimer afin de les aider dans les aspects de la vie quotidienne, de prédire des situations potentiellement dangereuses et de leur fournir un soutien physique et cognitive.

- Cible : Hôpitaux et cliniques, patients d’Alzheimer.
 - Agents : Agents contrôleurs, agents coordonnateurs, agent planificateur, agent utilisateur, agent super-utilisateur, agent administrateur, agent dispositif.
 - Type d’architecture : SOA, SMA. L’architecture se compose des applications, des services, des protocoles de communication, des agents plateforme et un système d’opération.
 - Méthodologie : Une méthodologie basée sur SMA, RFID (*Radio Frequency Identification*) et capteurs sans fils.
 - Mode de communication : SOAP (*Simple Object Access Protocol*), services Web, technologie RFID, réseau sans fil.
 - Résultat : SMA visant à améliorer l’aide et les soins de santé pour les patients Alzheimer.
 - Méthode d’optimisation : Non spécifiée.
- Palazzo *et al.* (2013) proposent une architecture orientée agent pour traiter le problème d’hétérogénéité de données qui caractérise les systèmes d’information dans le domaine de la santé demandant une grande qualité et efficacité d’interopérabilité entre ces différents systèmes. La validation du modèle proposé est réalisée par un scénario typique d’intervention d’urgence où une première équipe médicale d’assistance a un besoin urgent de récupérer, au moyen d’appareils mobiles, le Sommaire-Patient d’un citoyen, qui représente une partie de son dossier de santé électronique. Cet article propose une architecture orientée agent capable d’accéder aux données réparties géographiquement pour permettre aux professionnels de la santé de récupérer ou mettre à jour les dossiers de tous les patients de manière efficace et fiable. Une telle architecture est conforme aux exigences d’interopérabilité entre les différents établissements de santé et, en même temps, intègre les systèmes existants et les bases de données locales : cela permet de protéger les investissements réalisés par les établissements et institutions tel que requis par les directives ministérielles. Les caractéristiques principales de cette architecture sont :

- Domaine : Gestion des systèmes d'information et des données dans le domaine de la santé.
 - Objectif : Proposer une architecture orientée agent pour traiter la question d'interopérabilité et d'efficience des systèmes d'information conforme aux lignes directrices de l'Union européenne et aux exigences émises par le ministère italien de la santé.
 - Cible : Hôpitaux et cliniques.
 - Agents : Agent gestionnaire de documents, agent service, agent enveloppeur de base de données, agent passerelle, *etc.*
 - Type d'architecture : Une architecture distribuée orientée agent qui composée par trois niveaux d'abstraction : 1) plateforme locale, 2) plateforme de district et 3) plate-forme de client.
 - Méthodologie : Elle est basée sur les étapes suivantes : Premièrement, une utilisation des techniques de regroupement de données pour classer les patients en sous-groupes (ou *clusters*), chacun étant constitué de patients présentant des caractéristiques similaires, afin d'examiner l'exactitude des différentes approches pour prédire l'adhésion au sein de chaque groupe. Deuxièmement, une modélisation de l'influence des caractéristiques démographiques et de traitement des patients utilisant un méta-modèle dérivé des approches de réseaux de neurones artificiels et de la régression logistique pour aider à identifier les prédicteurs du comportement adhésion / non-adhésion.
 - Mode de communication : Agent passerelle.
 - Résultat : SMA pour la gestion des systèmes d'information dans le domaine de la santé.
 - Méthode d'optimisation : Réseaux de neurones artificiels, approches de régression logistique.
- L'objectif du travail de recherche de Cardoso *et al.* (2014) est de résoudre le problème d'interopérabilité entre les systèmes d'information de santé. Ils proposent une plateforme à base d'agent appelé « *Biomedical Multi-agent Platform for*

Interoperability » (BMAPI) qui est intégré à un autre système « *Agency for Integration, Diffusion and Archive of Medical Information* » (AIDA) qui est un système multi-agents (SMA) spécifiquement développé pour garantir l'interopérabilité des organismes de santé. Ce système est utilisé par tous les services hospitaliers qui communique avec AIDA, par exemple : l'unité de soins intensifs. L'objectif principal du BMAPI est de faciliter la communication entre les agents d'un système multi-agents. Il facilite aussi l'interaction entre les humains et les agents grâce à une interface qui permet aux administrateurs d'ajouter de nouveaux agents et de surveiller leurs activités en temps réel. En raison des caractéristiques du BMAPI il est possible d'assurer un travail continu des agents AIDA. Le BMAPI est installé avec succès dans « *Centro Hospitalier de Porto* » augmentant la fonctionnalité et la facilité d'utilisation globale de la plate-forme AIDA. Les caractéristiques principales de cette plateforme sont :

- Domaine : Santé, gestion des systèmes d'information dans le domaine de la santé.
 - Objectif : Développement et intégration d'un SMA de contrôle de fonctionnement des agents de la plateforme AIDA.
 - Cible : Hôpitaux et cliniques.
 - Agents : Agents de monitoring.
 - Type d'architecture : Architecture distribuée.
 - Méthodologie : Client/serveur : serveur principal, clients distants et contrôleur Web (protocole TCP/IP).
 - Mode de communication : ACL de FIPA.
 - Résultat : Développement et intégration d'un modèle SMA (BMAPI) dans la plateforme AIDA qui permet aux administrateurs de vérifier le fonctionnement des agents ou de détecter des éventuels échecs dans leur performance en temps réel.
 - Méthode d'optimisation : Non spécifiée.
- Dovgan *et al.* (2010) présentent un système multi-agents pour la prise en charge des personnes âgées vivant à la maison chez elles dans le but de prolonger leur

indépendance. Plusieurs démonstrations en ligne ont été effectuées pour tester la validité de ce système qui se compose de sept groupes d'agents qui fournissent une surveillance fiable, robuste et souple par la détection du patient dans son environnement, et par la reconstruction de sa position et de sa posture. Ce système permet d'avoir une sensibilisation physique de l'utilisateur dans l'environnement, en réaction à des situations critiques, appelant à l'aide dans le cas d'une situation d'urgence et émettant des avertissements si un comportement inhabituel est détecté. Ce travail vise à élargir la portée de détection de situations dangereuses et d'augmenter le système de détection par l'utilisateur-adaptation. Le système présente une partie du projet Confidence de l'UE FP7, dont le principal objectif est de construire un système de soins pour les personnes âgées. Un avantage important de ce modèle est qu'il est basé sur un matériel de localisation qui constitue par rapport aux systèmes vidéo de suivi de mouvement, une solution à faible coût. Les caractéristiques principales de ce système sont :

- Domaine : Services d'urgence, santé, personnes âgées.
- Objectif : Proposition d'un modèle multi-agents pour la prise en charge des personnes âgées.
- Cible : Cliniques, hôpitaux, services d'urgence, personnes âgées.
- Agents : Agent de communication, agent de prévention, agent d'interprétation, agent-capteur, agent de reconnaissance, agent de reconstruction, agent de raffinage.
- Type d'architecture : Architecture distribuée basée sur 6 exigences (contrôle des personnes et détection de l'état d'urgence en temps réel, indépendance du système par rapport au matériel, représentation abstraite des données, la redondance en combinant plusieurs méthodes, capteurs et points de vue, la stabilité et la robustesse du système, présentation d'un aperçu de la personne et de l'environnement).
- Méthodologie : LOPO (*Leave -One- Person- Out*).
- Mode de communication : Agent de communication.
- Résultat : SMA pour la prise en charge des personnes âgées.

- Méthode d'optimisation : Non spécifiée.
- Un autre SMA a été créé en Grèce par Maglaveras *et al.* (2010) et qui cherche à améliorer la surveillance, le suivi et le service éducatif d'un centre de contact médical pour la gestion des maladies chroniques. Ce travail propose un nouveau cadre pour 1) le codage des connaissances de prescriptions médicales, avec le système de surveillance des médicaments, sous une forme traitable par ordinateur; 2) l'exécution des processus dynamiques d'évaluation de la réponse de médicaments et de détection des événements indésirables à l'infrastructure du site du patient et 3) une communication bidirectionnelle entre la maison et l'environnement clinique pour l'échange d'informations. Les grands principes de la conception de l'architecture du système proposé sont l'interopérabilité et l'extensibilité. Les caractéristiques principales de ce système sont :
 - Domaine : Santé, contrôle des traitements médicaux et système de santé.
 - Objectif : Proposer un SMA de contrôle et de gestion des traitements médicaux.
 - Cible : Cliniques, hôpitaux.
 - Type d'architecture : Architecture distribuée (la fonctionnalité du Framework proposé est physiquement distribuée telle qu'elle est réalisée en partie dans la clinique, dans le hub de surveillance de patient et les capteurs).
 - Méthodologie : La structure proposée comprend deux sous-systèmes, un résidant sur le site clinique, et l'autre sur le site du patient.
 - Mode de communication : SOAP, SMS, réseau sans fil, services Web, MBU.
 - Résultat : SMA de contrôle et de gestion des traitements médicaux.
 - Méthode d'optimisation : Optimisation du traitement des médicaments.
- Patil *et al.* (2011) proposent un système multi-agents, basée sur la technologie mobile, de surveillance de la santé qui est le résultat de la combinaison d'un module de capteur sans fil médical avec des techniques d'exploration de données. «*Mobile Health Care*» est une application de la technologie informatique mobile pour améliorer la communication entre les patients, médecins et autres travailleurs de la santé. Les auteurs séparent la règle-association d'exploration en deux groupes de

données : 1) des données sensorielles recueillies auprès des corps des patients en temps réel et 2) des données historiques des patients recueillies dans le passé. Ce système recueille les modes de diagnostic, les classe dans des conditions normales et d'urgence et les déclare en comparant les deux groupes de données comme indiqué plus haut. Ainsi ils suggèrent des méthodes pour analyser et modéliser des modèles de l'état normal et d'urgence des patients. Les caractéristiques de ce système sont :

- Domaine : Santé, système de gestion et de surveillance de la santé.
- Objectif : Proposer un SMA de contrôle et de gestion de la santé des patients.
- Cible : Cliniques, hôpitaux et services d'urgence.
- Agents : Agent superviseur, agent d'aide à la décision, agent gestionnaire, agent médecin, agent de contrôle de patient, agent passerelle.
- Type d'architecture : L'architecture du système est essentiellement divisée en zone-corps du réseau (réseau des capteurs et le serveur domestique personnel des patients), le serveur médical intelligent et le système hôpital.
- Méthodologie : Intégration des SMA et des technologies mobiles.
- Mode de communication : RFID, protocoles de communication flexible (*Bluetooth*, *Zigbee*, *WLAN*)
- Résultat : Développement d'un SMA de soins de santé intégrant des services de diagnostic et de prescription en temps réel basé sur des données médicales et périphérique mobiles.
- Méthode d'optimisation : Non spécifiée.

Après la technologie objet, la technologie agent s'avère prendre de plus en plus d'importance. En effet, les moyens traditionnels ne permettent pas de répondre facilement aux nouveaux besoins de plusieurs domaines d'application. On parle principalement des systèmes complexes tels que les services préhospitaliers d'urgence qui nous intéressent dans cette thèse. Par conséquent, dans cette partie nous avons donné une présentation des principaux concepts multi-agents et une introduction aux concepts qui constituent la base de notre travail de recherche. Ces concepts nous ont permis de modéliser correctement, autant

que possible le modèle de planification et d'aide à la décision des services préhospitaliers d'urgence.

Or, une modélisation adéquate des processus, des données et des traitements semble insuffisante si on n'intègre pas l'aspect optimisation pour la conception d'un système réactif, robuste et efficace. C'est pour cette raison que nous avons associé optimisation et système multi-agents (spécifiquement l'ordonnancement et la planification des activités des SPU) afin d'améliorer la qualité de ces services tout en minimisant le temps-réponse des ambulanciers.

4.4 Synthèse

Les contraintes liées à l'intégration des méthodes et techniques issues du milieu industriel au domaine de la santé et essentiellement aux SPU peuvent être situées à plusieurs niveaux :

- La compréhension et la modélisation d'un système de santé sont considérablement liées à l'analyse des flux des usagers et non de services ou produits. La gestion des SPU dépend de plusieurs paramètres tels que la disponibilité des ressources, la nature de la demande en service, le temps-réponse, les conditions climatiques, *etc.*
- L'activité des ambulanciers paramédicaux est très diversifiée et exige une haute capacité d'adaptation à la demande. En plus, la notion d'urgence est à l'origine d'un ensemble de problème de gestion et de planification.
- Enfin, le secteur des SPU est hautement stochastique rendant difficile la planification des ressources.

La principale caractéristique de la planification liée aux SPU est d'affecter des quarts de travail aux ambulanciers paramédicaux et d'assigner ses ressources humaines à des ambulances. Celles-ci étant difficiles et leurs difficultés provenant de leurs niveaux de compétence, de leurs préférences, de leurs disponibilités, du nombre de véhicules, de la demande de services, du temps-réponse à respecter, d'un ensemble de contraintes organisationnelles, financières et de gestion sans oublier la notion d'horizon qui peut influencer le choix d'une méthode d'ordonnancement et de planification des SPU. Plusieurs études traitent la problématique d'ordonnancement et de planification des ressources humaines, mais peu de travaux de recherche intègrent tous ces éléments.

Le Conseil canadien de la santé affirme (HCC, 2013) que « la prestation de services de santé accessibles et de grande qualité dépend de la présence au bon endroit des bonnes personnes aux bonnes compétences ». Le problème fondamental de toute affectation des ambulanciers paramédicaux est dans les facteurs aléatoires et les cas totalement incertains caractérisant le domaine des SPU.

Et comme on a vu précédemment, beaucoup de travaux de recherche ont traité le problème d'affectation et de planification du personnel dans le secteur de la santé. Mais l'analyse de l'état de l'art de ces travaux nous montre que ce problème n'est pas très abordé dans le domaine des SPU (d'une manière intégrée et avec prise en compte de la demande en service, de la gestion de la flotte de véhicules et d'autres facteurs). L'existence de l'incertain et d'une manière quasi-permanente rend le problème de prise en charge des patients et la gestion des SPU de plus en plus difficile. Le facteur imprévisible se manifeste au niveau du processus de la gestion de la demande, au niveau du processus de la fabrication de soin et encore au niveau de la disponibilité des ressources matérielles et humaines.

4.5 Problématique

Nous rappelons ici nos principaux constats concernant la problématique de planification des services préhospitaliers d'urgence :

- Problème complexe (nombre élevé des employés, plusieurs contraintes, masse salariale importante, plusieurs processus, flotte de véhicules importante, service critique, *etc.*).
- Peu d'articles traitent le problème de planification des ambulanciers paramédicaux (ou de gestion des événements spéciaux).
- Les travaux de recherche se focalisent sur un sujet spécifique de ce domaine (soit la gestion des véhicules, l'allocation des véhicules, *etc.*) sans évaluation de leurs impacts sur les autres composantes de cette problématique.
- Peu de travaux de recherche combinent les SMA et méthodes d'optimisation dans la planification des SPU.

- Absence d'une approche de développement, de conception ou de modélisation dédiée aux systèmes de planification des SPU.
- Absence de travaux de recherche qui visent à diminuer le temps-réponse des ambulanciers paramédicaux.
- Absence de travaux de recherche qui visent à améliorer la performance globale des systèmes des SPU.

Face aux problèmes de planification des services préhospitaliers d'urgence, il semble nécessaire de proposer, de modéliser et de mettre en œuvre des nouvelles solutions et approches de résolution. Ainsi, les SPU nécessitent de la logistique : disposer des bonnes ressources au moment opportun et à l'emplacement adéquat, et d'établir la coordination avec d'autres structures. Cela pourrait faire intervenir des notions, des concepts et des techniques de modélisation et d'optimisation; un ensemble indispensable à la planification des ressources. Pour répondre aux besoins de la population en SPU, accroître le personnel et développer les ressources matérielles disponibles seraient les solutions les plus accessibles. Toutefois, ces dernières coûtent cher. Quant aux services publics et privés, leur dilemme est semblable : offrir le meilleur service au meilleur coût. Dans cette situation, un certain compromis est toujours nécessaire, à savoir élaborer des stratégies permettant d'améliorer la qualité des services sans trop en augmenter le coût. C'est dans cette perspective qu'il est intéressant d'examiner ce que l'informatique et la recherche opérationnelle peuvent offrir.

Une amélioration de l'offre de services préhospitaliers d'urgence pour mieux répondre et couvrir la demande est un facteur indispensable à l'évaluation de la performance et la qualité des SPU. Cet élément a aussi une influence sur les coûts et sur le temps-réponse des ambulanciers. Le but de notre travail de recherche est d'optimiser la planification des ressources humaines et matérielles (techniciens ambulanciers et véhicules) des services préhospitaliers d'urgence afin de mieux répondre à la demande de service. De là ressort la problématique de la planification des ressources chez les SPU qui exige une stratégie bien définie et une bonne gestion des ressources humaines et matérielles.

4.6 Objectifs de recherche

Notre objectif principal est d'optimiser la planification des ressources humaines et matérielles (techniciens ambulanciers et véhicules) des services préhospitaliers d'urgence afin de mieux répondre à la demande de service. Il devra nous permettre de répondre aux questions suivantes :

- De quelle façon résoudre ce problème d'optimisation de la planification des ressources humaines et matérielles (techniciens ambulanciers et véhicules) d'une manière précise, analytique et intégrée afin de mieux répondre à la demande de services préhospitaliers ?
- Quelle approche proposer et quelle méthodologie utiliser pour la résolution de ce problème d'optimisation de la planification de ces ressources dans un cadre applicatif ?

Pour y répondre, plusieurs objectifs spécifiques doivent être atteints :

- Objectif 1 : Optimiser la confection des horaires des techniciens ambulanciers afin 1) de minimiser les carences d'offre pour chaque période de l'horizon de solution afin de respecter la demande de services préhospitaliers d'urgence, 2) d'égaliser le niveau de couverture sur tout l'horizon de solution et 3) de satisfaire les contraintes de gestion.
- Objectif 2 : Développer une méthodologie de travail globale et intégrée pour la conception et le développement d'un système d'optimisation de la planification des services préhospitaliers d'urgence.
- Objectif 3 : Concevoir et développer une architecture générale et systémique capable de 1) détecter et d'identifier les faits perturbateurs de la planification des SPU et d'y réagir de bon escient et 2) d'assister l'utilisateur en lui proposant des solutions d'affectation des techniciens ambulanciers et des ambulances.

4.7 Méthodologie

La problématique abordée se trouve à la croisée de deux domaines de recherche : l'optimisation et les systèmes multi-agents. La jonction de ces domaines est rendue nécessaire par des stratégies adaptatives à mettre en œuvre et la volonté de prendre en compte l'état réel des services préhospitaliers d'urgence. Si certaines de nos contributions sont plus orientées vers l'un de ces deux domaines, la majorité reflète la double orientation de notre travail de recherche. La méthodologie employée dans ce travail de recherche se compose de 3 phases illustrée dans la Figure 4.6. Dans la première phase, nous avons réalisé une revue de la littérature. Trois domaines se démarquent dans cette première phase, la revue des concepts relatifs aux services préhospitaliers d'urgence, à la planification des ressources et les méthodes d'optimisation et enfin aux systèmes multi-agents. Dans la deuxième phase et après avoir acquis les connaissances nécessaires pour ces trois domaines, nous avons commencé l'élaboration des concepts d'analyse, de modélisation, de conception, de développement, d'implantation et de validation pour l'optimisation de la planification des SPU afin de diminuer le temps réponse des ambulanciers paramédicaux. Cette partie est réalisée en collaboration avec la Corporation d'Urgences-santé. Nous avons validé et raffiné notre modèle d'optimisation, notre approche globale et intégrée et enfin, notre plateforme multi-agents. La dernière phase, nous avons obtenu les résultats finaux de notre travail de recherche. Ces résultats ont fait l'objet des publications.

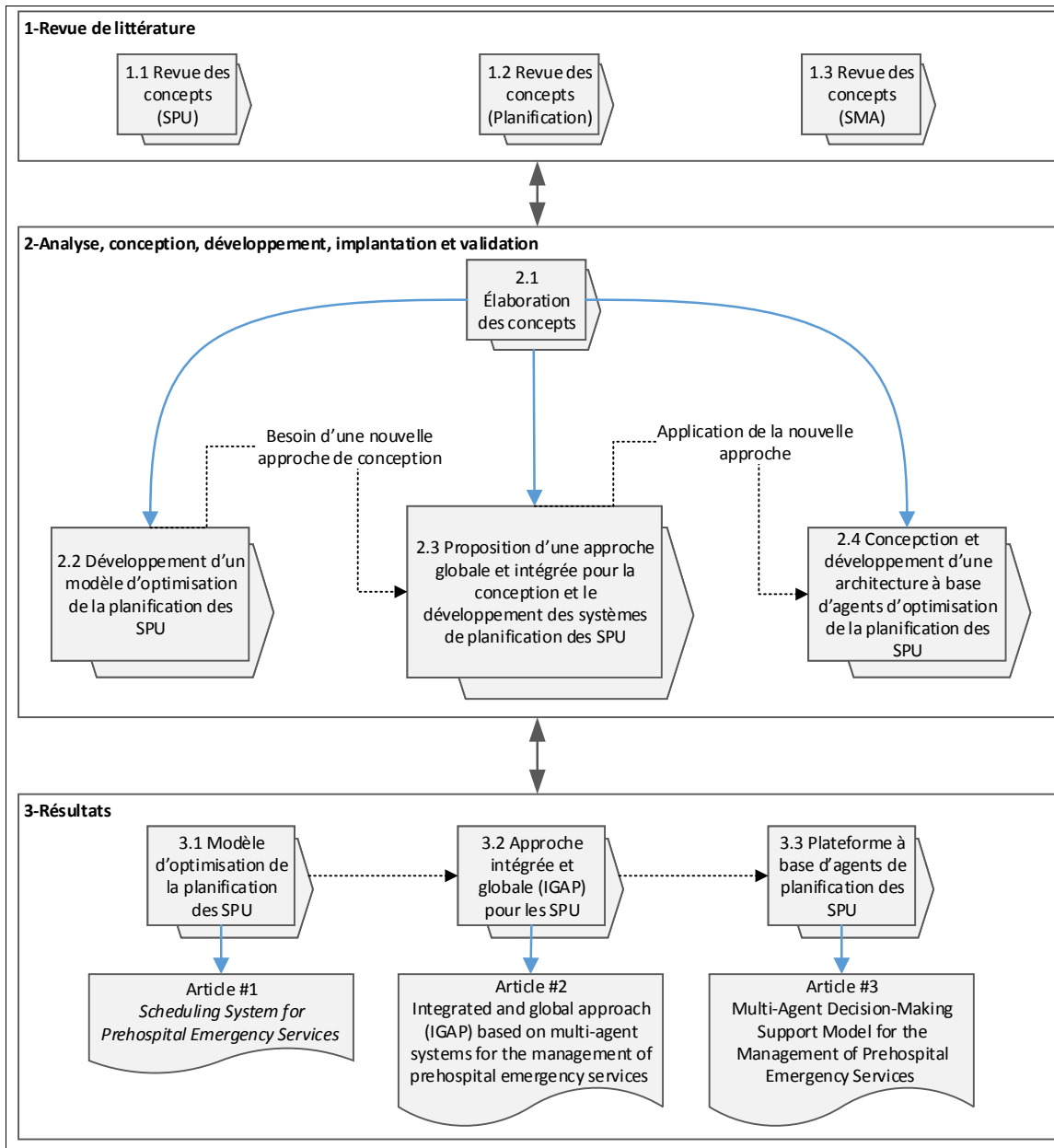


Figure 4.6 Méthodologie de recherche

4.8 Contributions

Les contributions principales de ce travail de recherche sont :

- Contribution 1 (présentée dans l'Article#1) : Le développement d'un nouveau modèle de confection des horaires des techniciens ambulanciers qui permet de mieux couvrir

la demande de services préhospitaliers d'urgence et d'intégrer l'ensemble des contraintes de gestion (règles de la convention collective, contraintes logistiques, contraintes financières et règles implicites). Le processus d'optimisation est composé de deux parties principales et la méthode de résolution est fondée sur la programmation par contraintes et la programmation linéaire adaptée. L'objectif est de produire un système utilisable sur des ordinateurs de bureau tout en étant fréquemment utilisé pour évaluer un large éventail de scénarios. Ce modèle est testé dans un contexte réel et les résultats sont prometteurs en termes de couverture de la demande de services et de satisfaction des contraintes de gestion.

- Contribution 2 (présentée dans l'Article#2) : La proposition d'une méthodologie globale et intégrée appelée IGAP (Integrated and Global Approach) pour le développement des systèmes d'optimisation de la planification des ressources humaines et matérielles des services préhospitaliers d'urgence. Cette méthodologie vise l'intégration de tous les processus des SPU (ou au moins les processus les plus importants) et une amélioration de la performance globale des SPU.
- Contribution 3 (présentée dans l'Article#3) : La proposition d'une architecture à base d'agents afin d'optimiser la planification des ressources humaines et matérielles (techniciens ambulanciers et véhicules) des services préhospitaliers d'urgence. Cette architecture est basée sur notre méthodologie IGAP et sur la méthode O-MASE.

Enfin, les articles sur lesquels s'appuie cette thèse sont les suivants :

- Article 1 : Adil Chennaoui et Marc Paquet. "*Scheduling model for Prehospital Emergency Services*". Soumis à l'*European Journal of Operational Research*, Elsevier.
- Article 2 : Adil Chennaoui et Marc Paquet. "*Integrated and global approach (IGAP) based on multi-agent systems for the management of prehospital emergency services*". Soumis à *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier.
- Article 3 : Adil Chennaoui et Marc Paquet. "*Multi-Agent Decision-Making Support Model for the Management of Prehospital Emergency Services*". Publié dans *International Journal of Machine Learning and Computing, IACSIT*.

4.9 Limites

- Ce travail de recherche prend en considération le contexte, les facteurs et les contraintes de planification des services préhospitaliers d'urgence au Québec, principalement ceux définis chez la Corporation Urgences-santé de Québec.
- Cette étude ne traite pas le problème de répartition, d'allocation ou de la localisation géographique des ambulances.
- Cette thèse s'intéresse principalement aux problèmes 1) d'optimisation de la planification des services préhospitaliers d'urgence à court, à moyen et à long terme, 2) d'optimisation de la gestion des remplacements et 3) d'optimisation de la gestion des événements spéciaux.

4.10 Conclusion

Ce travail de recherche apporte des éléments de réponses à la problématique de planification et de gestion réactive des services préhospitaliers d'urgence afin de minimiser le temps-réponse des ambulanciers paramédicaux. Plus particulièrement, l'approche et le modèle proposés intègrent des composantes d'aide à la décision et d'optimisation dans une architecture multi-agents. La plateforme ainsi constituée permet de répondre rapidement aux divers aléas survenant dans la planification des SPU. Elle sert donc à la mise en place de processus adaptatif et pourra être étendue au-delà de la problématique de la planification des SPU. L'approche et la plateforme proposées sont validées sur un cas démonstratif issu de cas réel des services préhospitaliers d'urgence. À partir de ces expérimentations, des mécanismes ont été proposés afin d'améliorer notre approche et le comportement des algorithmes développés dans un contexte d'optimisation avec un processus d'évaluation des solutions.

CHAPITRE 5

ARTICLE 1 : INTEGRATED AND GLOBAL APPROACH (IGAP) BASED ON MULTI-AGENT SYSTEMS FOR THE MANAGEMENT OF PREHOSPITAL EMERGENCY SERVICES

Adil Chennaoui et Marc Paquet

Département de génie de la production automatisée, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article soumis à *Computers & Industrial Engineering*. Février 2015.

Résumé

Les services préhospitaliers d'urgence (SPU) sont des systèmes de sécurité publique responsables du transport préhospitalier des patients. Leur but est de répondre convenablement aux appels de la population en fournissant des services d'aide et de transport ambulanciers. Afin d'atteindre cet objectif, un ensemble d'outils peuvent être utilisés pour améliorer la productivité et la réactivité des SPU. Ce document s'intéresse aux systèmes multi-agents réactifs qui se trouvent à la croisée des chemins de deux domaines scientifiques majeurs : d'une part les systèmes d'information et d'autre part la recherche opérationnelle. Les systèmes d'information tendent vers des applications plus complexes nécessitant des comportements plus intelligents. Les méthodes de la recherche opérationnelle tendent vers la résolution de problèmes plus réalistes pouvant demander des réponses en temps réel.

L'objectif de cet article est de présenter une introduction des systèmes multi-agents dans la planification et la gestion des SPU et de proposer une nouvelle approche pour sa résolution appelé IGAP (*Integrated and Global Approach for Prehospital emergency services*).

Abstract

Prehospital emergency services (PES) are public medical and security systems responsible for the prehospital transport of patients. The purpose of these systems is to respond suitably to population calls by providing aid services and transporting patients to the appropriate hospitals. To achieve this goal, a set of tools can be used to improve the productivity and reactivity of PES. This paper focuses on reactive multi-agent systems that are at the junction of two major scientific areas: information systems and operational research. Information systems are used to develop highly complex applications that require intelligent behaviors. Methods of operations research are used to solve realistic problems that require responses in real time. This paper aims to:

- First, present an introduction of reactive multi-agent systems and decision support to the planning and management of PES problems.
- Second, propose a novel approach for their resolution called IGAP (Integrated and Global Approach for Prehospital Emergency Services).

Keywords— Multi-agent system, decision support, prehospital emergency services, planning, optimization.

5.1 Introduction

After many years of object technology dominance, agent technology has become increasingly important. Indeed, it can easily meet growing application needs, which are reproduced with difficulty by traditional means. It includes complex decision support systems, such as those related to health and PES fields that are of special interest to us in this paper.

Autonomous agents and multi-agent systems (MAS) represent a new way to analyze, develop and implement complex information systems. Agents can be used in a wide and expanding field of applications (Zhong et al., 2012). When discussing this area, it is necessary to define agents, systems based on agents and multi-agent systems (Isern et al., 2010). However, the

definitions found in the literature for these terms demonstrate that there are significantly different interpretations from different authors.

Nonetheless, PES are essential, and they are characterized by their ability to meet different needs expressed by the population. In addition to medical concepts, these services require logistics, i.e., transferring the right equipment to the right paramedical team at the right moment in the right place, and cooperation with other entities. This involves concepts and tools of modeling necessary to identify:

- Issues and problems,
- Analysis and modeling processes,
- Control and optimization processes,
- Planning and scheduling of resources,
- Performance control processes.

Effective and efficient management of prehospital emergency services involves the improvement of services provided to citizens and the reduction of operating costs. However, the response time of an ambulance is one of the essential parameters for the evaluation of the performance and quality of PES. The improvement of this parameter has an influence on costs. Such a situation requires a preconceived strategy and proper organization of human and material resources.

To solve this problem, increasing the human and material resources available is the simplest solution, but this is expensive. The dilemma is similar for public and private services: provide the best service at the lowest cost. In such a situation, it is always necessary to find a compromise. We have to look at alternatives that improve the quality and level of service without increasing costs. In this regard, it is therefore interesting to examine what information technology and operational research can offer. In the specific context of management of prehospital emergency services, exploration of multi-agent systems and optimization methods appears to be very attractive.

First, we give an introduction to multi-agent systems and their application in PES. Second, we present our Integrated and Global Approach based on multi-agent concepts to correctly model the reality of decision support for PES.

5.2 Overview of multi-agent systems in the PES planning

Multi-agent systems are based on distributed artificial intelligence, and they allow modeling applications where classical modeling is inadequate or when the system is often naturally distributed. If a problem is not naturally distributed, we can choose to distribute it for reasons of simplification.

It is then the responsibility of the system designer, as possible, to find the best distribution for the problem that he wishes to solve. Applications that are naturally distributed are generally those native to the real world, for example, those concerning the simulation of ecosystems (Krogstie, 2012).

The properties of intelligent agents (autonomy, activity and social skills) and the architecture of multi-agent systems (distributed treatment of information, communication, coordination, negotiation) have proven to be promising for solving problems in the domain of the health.

Intelligent agents have already been proposed to address different types of problems in the field of health. We have listed some examples of research in Tableau 5.1 to show the usefulness and importance of MAS in the management of PES. We note that agent-based modeling can be of use in several ways according to the case studied and can provide solutions to a variety of issues. We also observe that most MAS do not incorporate optimization methods. The literature review of multi-agent systems in PES gives us an idea about the subjects studied. We can see that there are few articles dealing with the problems of paramedic scheduling and less with the management of prehospital demand or special events. Yet in the literature, these subjects are studied several times in the health field (nurses, doctors), in manufacturing (scheduling and staff planning), etc.

Tableau 5.1 MAS in prehospital emergency services

Reference	Areas				
	Human Resource Management	Vehicle Management	Demand Management	Special Events Management	Multi-Fields
(Lopez et al., 2008)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(Reddy et al., 2009)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(Sorwar and Ali, 2010)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(Gabdulkhakova and Konig-Ries, 2011)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(Sokolova and Caballero, 2012)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
(Ibri et al., 2012)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(Nowroozi et al., 2012)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(Toro-Díaz et al., 2013)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(Garcia-Magarino and Gutierrez, 2013)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(Anagnostou et al., 2013)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(Maleki et al., 2014)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(Billhardt et al., 2014)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(Chennaoui and paquet, 2014)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
(Zhang et al., 2014)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
(Groza et al., 2014)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(Talarico et al., 2015)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

The research in Tableau 5.1 present a series of solutions related to planning problems of prehospital emergency services. Garcia-Magariño and Gutierrez (2013) present a new multi-agent system based on an interaction organizational model for emergency services and crisis

management. The proposed model considers an emerging organization of peers who adopt different roles depending on the circumstances. It is based on several studies of existing cases in which agents follow a sequence of interactions, and the organization aims to optimize its human resources. Lopez et al. (2008) propose a multi-agent system of ambulance allocation for patients while reducing the transport time. The multi-agent system provides the calculation of this coordination. The system architecture consists of an "Ambulance team" agent and "Ambulance Coordinator" agent. This model represents the current and real organization ambulances for a given region. The proposed system maintains a real distributed organization of resources. Nowroozi et al. (2012) use Unified Modeling Language to represent a "Recognition-Primed Decision" (DPR) model. The agent-based model is simulated in the RoboCup Rescue environment. The environment simulates the frequency of incidents that require the intervention of ambulance teams, police and firefighters to control the crisis. The results of the experiments carried out are positive for each calculation model of DPR and demonstrate the high capacity of such a model. Anagnostou et al. (2013) present a hybrid agent-based model for distributed simulation of discrete events for the PES. They demonstrate the possibilities offered by this technology to perform scenarios, aiming for the overall and integrated improvement of prehospital emergency services and crisis management systems. The results show that we can use the distributed simulation to represent the real system successfully. Chennaoui and Paquet (2014) present a new and more effective approach for management and optimization of prehospital emergency services integrating various components. This approach includes scheduling planning, replacement management, vehicle fleet management, deposit capacity management, covering of the demand and the management of special events. The proposed solution is composed of two main parts. The first part is a reactive multi-agent model integrating several algorithmic components. The second part corresponds to a decision support architecture that facilitates intervening in the resolution process and visualizing results.

The proposed solutions are often satisfactory but are without any consideration or evaluation of their impacts on other components or processes. For example, the works of Ibri et al. (2012) and Talarico et al. (2015) propose a model for solving the vehicle allocation problem without evaluating the consequences of such a model on paramedic scheduling or on the

capacity of vehicle depots. The works of Magariño and Gutierrez (2013) and Anagnostou et al. (2013) propose models to solve the scheduling problem without considering the problems of absence management and special events.

However, efficient and effective multi-agent systems for the management of prehospital emergency services must integrate new methods. They must take into account several processes and goals that allow for improving the overall performance. It is in this context that we present in the next section a proposal for a new approach to solving this problem.

5.3 IGAP for planning of prehospital emergency services

The complexity of the PES planning problem, which is classified in the highly combinatorial allocation problems category, comes from the non-linearity of the objective function, the entire character of the decision variables and the numerous constraints taken into account. The immediate challenge is to meet, as best as possible, the various constraints and goals. In addition, the PES system consists of several actors (ambulances, paramedics, administrative staff, doctors, healthcare facilities, etc.), various processes (paramedic scheduling process, estimation demand process, replacement management process, management of special events process, etc.), a set of constraints (limited number of working hours, limited number of vehicles, unplanned events, rules of the collective agreement, etc.) and several goals (meet organizational constraints, meet demand, meet paramedic preferences, meet financial constraints, etc.).

Traditional modeling techniques are hardly usable in PES. In fact, the parameters and constraints of PES systems are various and contradictory. Sometimes, there is no way of knowing the full set of parameters that are involved in the modeling. The multi-agent approach then allows for resorting to a local modeling. In this context, the prehospital emergency services must be transformed from a systemic view toward performance goals. This performance is defined primarily by the level of achievement of fixed objectives by the system. Additionally, as mentioned in section 2, research work in the field of PES presents a set of solutions that resolve a limited part of this issue. To address this situation, we propose an integrated and global approach called IGAP (Integrated and Global Approach for PES).

By "Global," we aim to achieve a set of objectives for local PES processes leading to the achievement of the common overall objective while maximizing gains and minimizing costs. By "integrated," we intend to include all PES processes (or at least the most important processes). Our approach is based on the principles of high levels of communication and interaction between different actors and processes, allowing a strong reaction of the proposed model.

5.3.1 IGAP presentation

This approach is simple and covers four areas of PES:

- Demand management,
- Personnel management,
- Vehicle management,
- Deadline management.

It stretches over three horizons:

- Short term,
- Medium term,
- Long term.

For each horizon time, IGAP includes a set of processes as shown in the following figures (Figure 5.1, Figure 5.2, Figure 5.3):

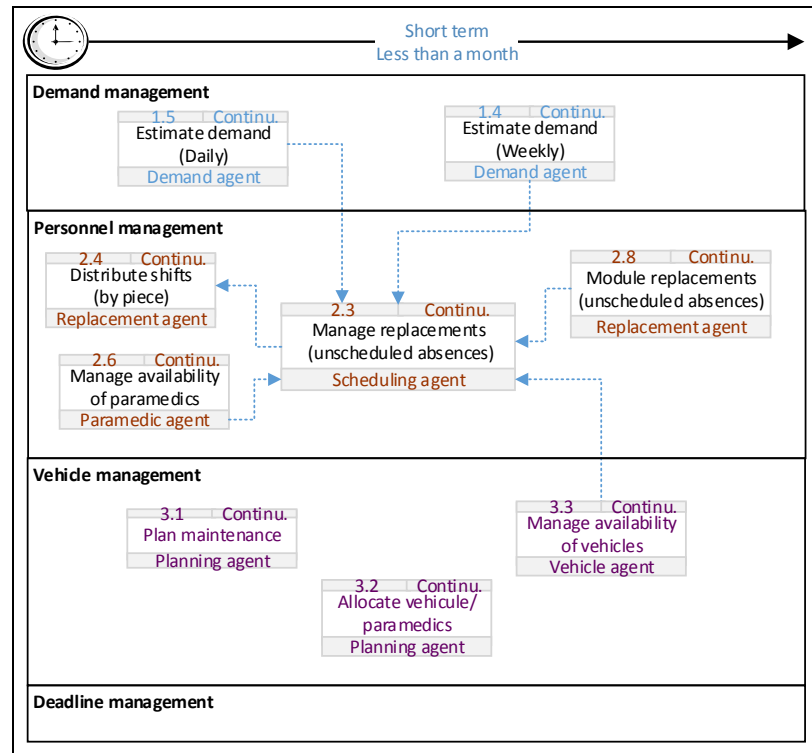


Figure 5.1 Areas and processes of IGAP (Short-term)

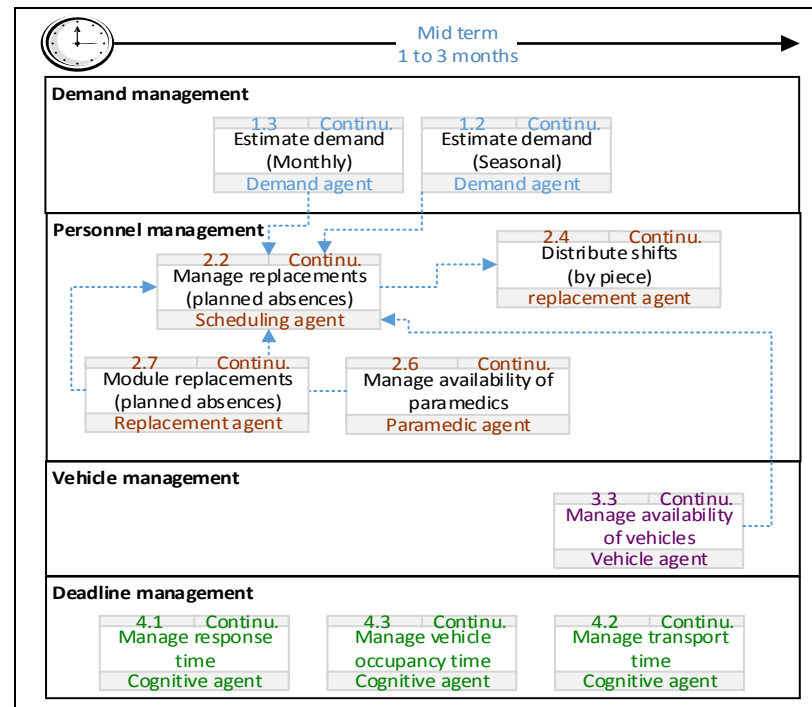


Figure 5.2 Areas and processes of IGAP (Mid-term)

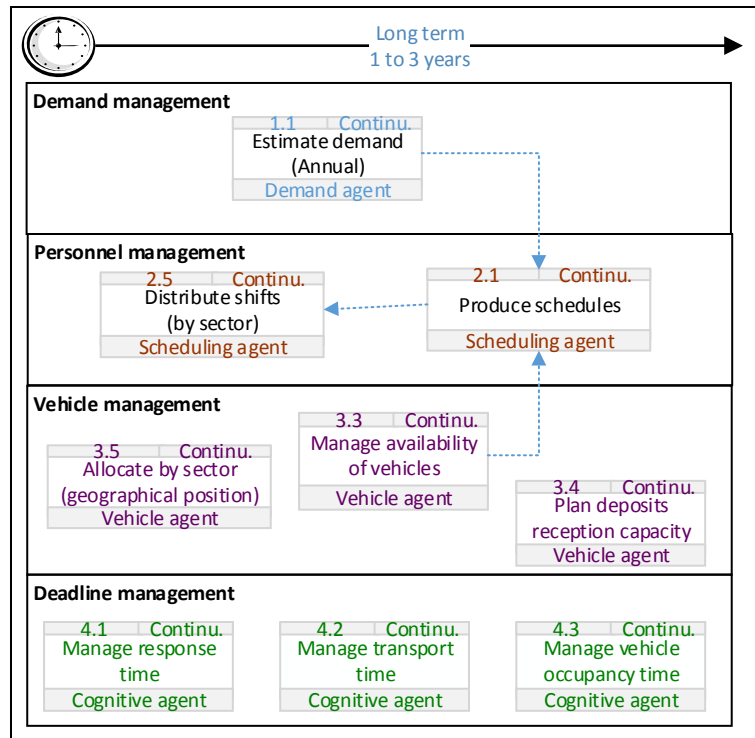


Figure 5.3 Areas and processes of IGAP (Long-term)

Each area proposes processes to facilitate modeling. All of these steps allow for building the general architecture of the system. Thus, it defines several solution horizons (short-, medium- and long-term), and a sub-process can be spread over a given horizon. Models and mechanisms of decision support are used in these processes, and even their objectives may differ according to the solution horizon. For example, the process of estimating demand spreads over the long, medium and short term. This process allows an annual, seasonal, monthly and daily estimation of demand. The first estimate is used in the scheduling of the annual hourly model. The other estimates are used to make adjustments to the hourly model or to define staff replacement needs according to the chosen resolution interval.

5.3.2 Phases of IGAP

The goal of our approach is to guide the designer through the development process of a PES planning system. This approach consists of six main phases that will facilitate the design and development. They aim to identify the goals and processes of the system and to define and analyze its needs, interactions and architecture. These phases are presented in Figure 5.4.

These phases are essential and sequential, but the designer may change their order execution as required. The objective is to propose a general presentation, from our experience, of the phases of design and development of a PES planning system. For each phase, we can integrate formalisms and methods of design, analysis, validation, development and integration (O-MASE, UML, BPMN, etc.). The six phases are presented in the next paragraphs.

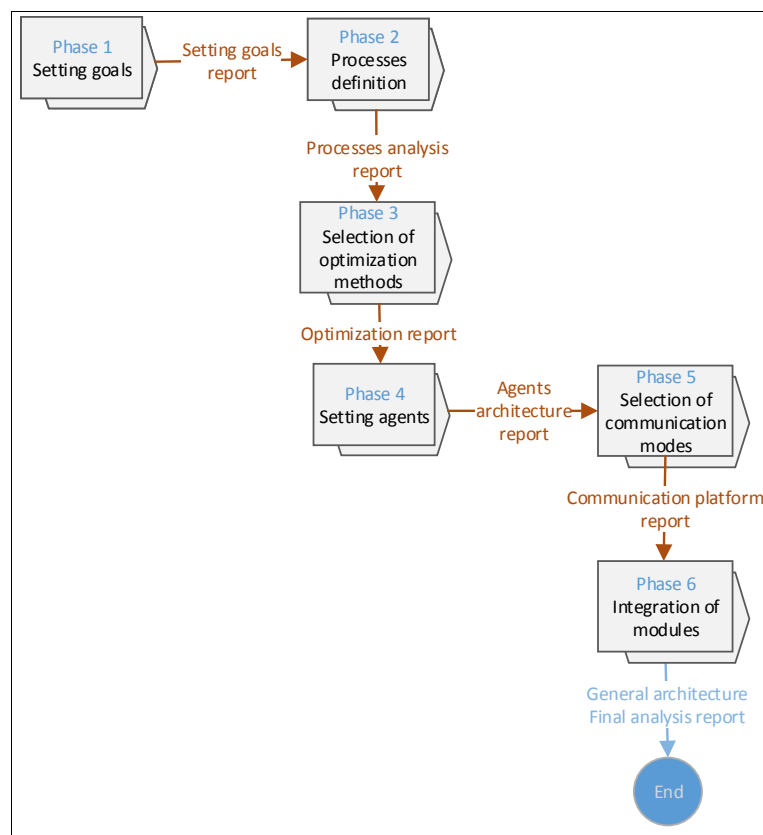


Figure 5.4 IGAP phases

5.3.2.1 Phase 1: Setting goals

In this phase, we define the overall goals, regional goals and sub-goals of the system as illustrated in Figure 5.5. These goals may be operational, financial, performance-based or other goals. They influence the design and the overall behavior of the system, and they are classified into three levels:

- First, short-term goals: these consist of defining a redeployment strategy, also known as a relocation problem, which refers to the temporary repositioning and scheduling of available paramedic teams and vehicles. These changes may be related to temporal and geographical fluctuations of demand of the PES (special events) or to the number of paramedics available (absences, replacements), etc.
- Second, mid-term goals: these consist of determining the number of paramedic teams and vehicles necessary in each region to achieve the predetermined level of service. This consists of establishing schedules for each ambulance and each paramedic. This aims to satisfy the demand of prehospital emergency services.
- Third, long-term goals: these mainly consist of setting the service level as well as other economic or social performance objectives, such as determining the skills and the aggregate number of human resources to hire and the appropriate ambulance to use, identifying the fixed locations to perform central operations as well as determining, throughout the covered region, the locations where paramedic teams could be stationed to wait between prehospital transportation and the maximum number of paramedic teams that can be associated.

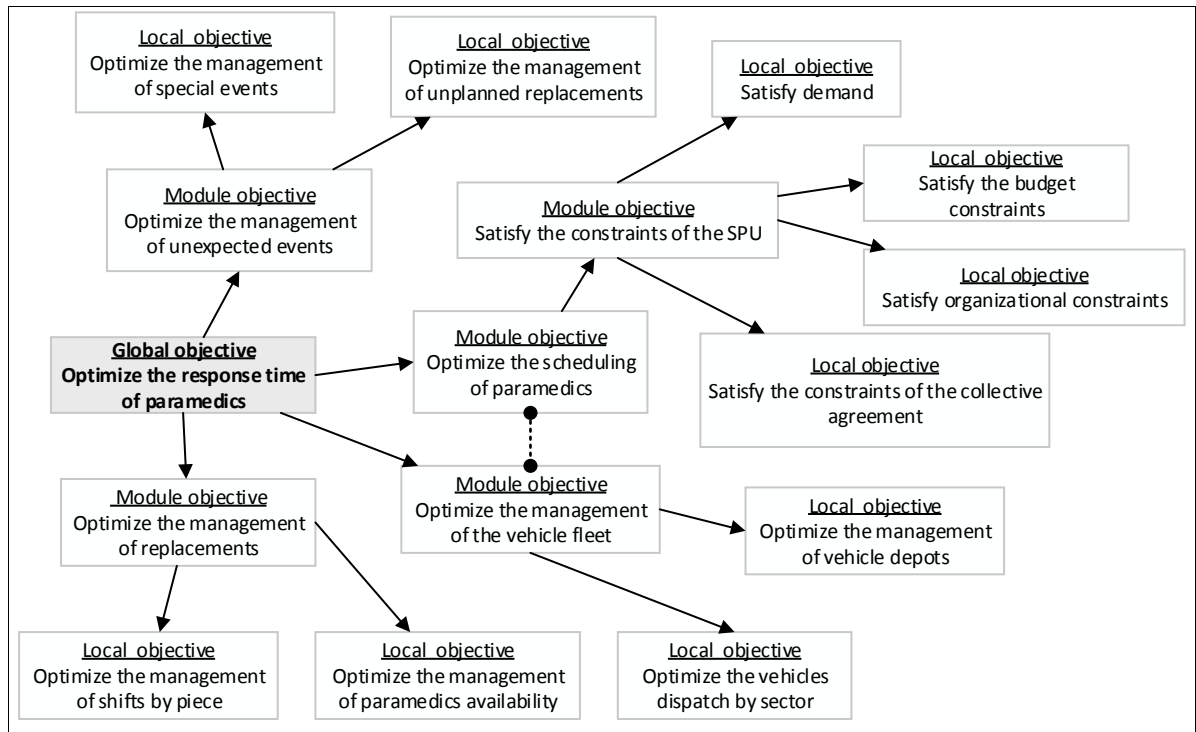


Figure 5.5 Example of setting goals

5.3.2.2 Phase 2: Processes definition

In this phase, we define main and secondary processes (sub-processes) of the system, input and output data of each process and also the association relationships of each process or processes group to a goal of Phase 1. Tableau 5.2 presents a list of example processes. Tableau 5.3 shows an example of a matrix used to associate each process or process group to a goal or multiple goals for a given horizon of resolution.

Tableau 5.2 Example of processes

Process	Description	Input	Output
P.1	Estimation of annual demand	Number of calls received per period. Number of ambulance transports by period	Average annual demand for each day of the week.
P.2	Definition of	Number of ambulance	Response time in an

	ambulance response times	transports by period. Standards Defined by the competent authorities.	urban area. Response time in a rural area.
P.3	Scheduling of full- time paramedics	Average annual demand for each day of the week discretized to a half-hour. Scheduling parameters.	Annual working schedules model
P.4	Sector Allocation	Annual working schedules Model. Capacity of vehicle depots. Demand by Sector.	Working schedules model by sector.
P.5	Distribution of shifts – by the piece	Availability of part-time paramedics. Quota Grid. Demand for ambulance transports for the period.	Working schedules model of shifts by the piece by period.

Tableau 5.3 Goals and processes Matrix

	Short-term	Mid-term	Long-term
	Optimization of shift distribution - by the piece	Optimization of the management of replacements	Paramedic schedule Optimization
P.1: Estimation of annual demand.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
P.2: Setting of ambulance response times	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
P.3: Scheduling of full-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

time paramedics			
P.4: Sector allocation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
P.5: Distribution of shifts by piece.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

5.3.2.3 Phase 3: Selection of optimization methods

As needed, we define an optimization method for each process or goal. Section 3.4.1 presents more detailed information on this phase.

5.3.2.4 Phase 4: Setting agents

In this phase, we define the agents of the model, their roles, their internal architectures and the processes with which they are associated. The agent represents the base component of the IGAP. It must be able to perceive the changes in its environment and react within a limited time. Its actions will often be directed by the goals, and it must be able to take initiative at the appropriate time. If necessary, it must interact with humans or other artificial agents in their activities to solve their own problems. These agents must be equipped with sensors to perceive their environment and with effectors to influence it. In IGAP, we propose to locate and limit each agent's actions and perception capabilities. These constraints are grouped under the concept of the locality principle. An agent satisfying this principle perceives and can change only a part of the contained environment in a certain neighborhood. This concept of neighborhood is highly dependent on the problem and is often implicitly defined.

To specify formal settings, the designer must choose and define the environmental classes. The internal architecture of an agent must designate all its data structures and internal processes. This allows it to make a decision, to choose an action and to change its environment. For IGAP, we propose the use of reactive agents for two primary reasons. First, the reactive agents are simple and easily adaptable to meet the PES problem. Such agents may provide practical answers despite the simplicity of their behavioral architecture. Second,

the behavior of reactive agents is easily represented and manipulated in mathematical frameworks (integration of optimization methods).

5.3.2.5 Phase 5: Selection of communication modes

Communication is a very important concept in IGAP. Without communication, an agent is only an isolated individual, a deaf and mute person that acts on itself. Communication allows agents to exchange information, requests for services, etc. It also allows an agent to act with another, to provide it information or ask it to change its behavior.

The communication between agents may take various forms. There are two principal languages of communication, namely KQML and ACL, to standardize the communication between agents. KQML and ACL are distinguished by the semantics of the language acts used. In effect, ACL is very much like KQML with only 22 performatives and has been very clearly formulated: performative semantics are described in a specialized language called SL for semantic language (Tweedale and Jain, 2012). When two agents communicate, their goal is to exchange information but also, above all, to understand each other. As a result, regardless of the language or form of communication, the importance is the ability of an agent to understand other agents. In the majority of cases, the communication is performed by sending messages and sometimes by sending signals or stimuli in the environment.

5.3.2.6 Phase 6: Integration of modules

In this phase, we define the modules of the general architecture of the proposed model. IGAP offers a 3-level basic architecture as shown in Figure 5.6:

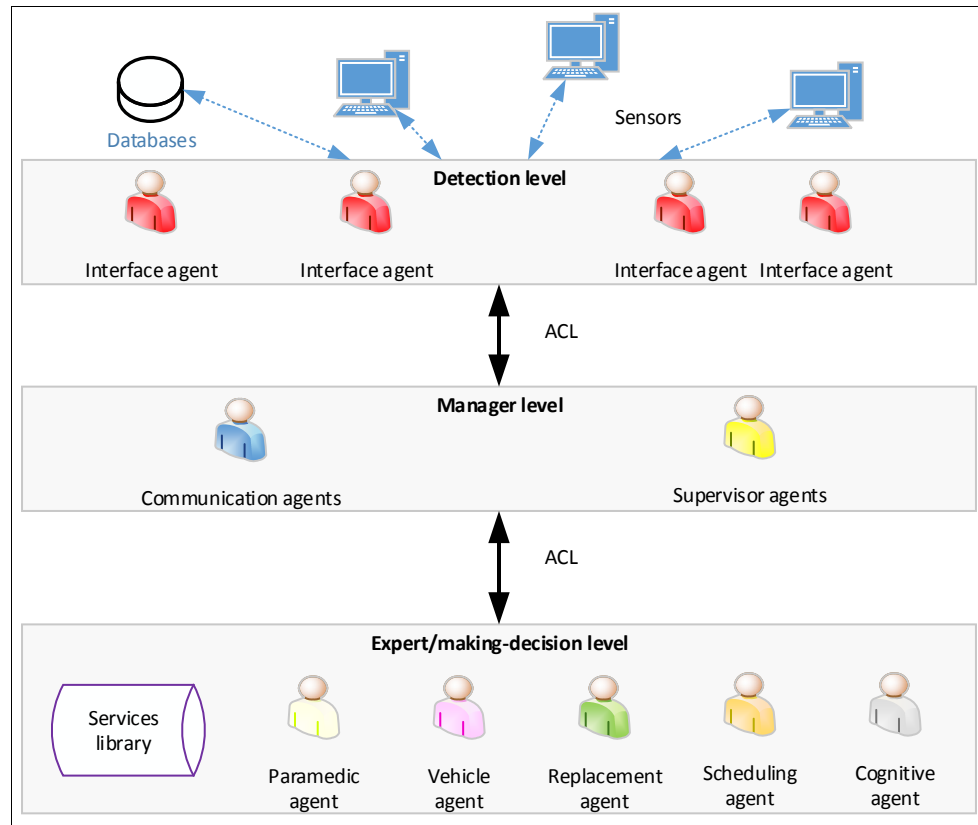


Figure 5.6 IGAP basic architecture

The first level represents the detection layer. It is connected directly to the sensors to detect changes in the environment. It is controlled by the interface agent that is responsible for the interpretation of the information sent to and received from this environment. The second level is the management layer. It is controlled by two main agents: the Supervisor agent and Communication agent. They organize and control the behavior and functioning of the model. The third level is that of reasoning and decision making. It is controlled by several agents and uses a library service to facilitate collaborative decision making. Communication protocols proposed in this architecture are based on the norm ACL. It is used to facilitate communication between the different levels and different agents.

This phase also involves setting the various modules of this architecture. Each module contains a set of processes, agents and one or more regional objectives. These modules together enable the achievement of the overall objective of the system. Each module contains validation mechanisms to ensure the overall operation of the module. It is the responsibility

of the designer to define the appropriate validation strategy for its environment. Figure 5.7 shows an example of a paramedic planning module.

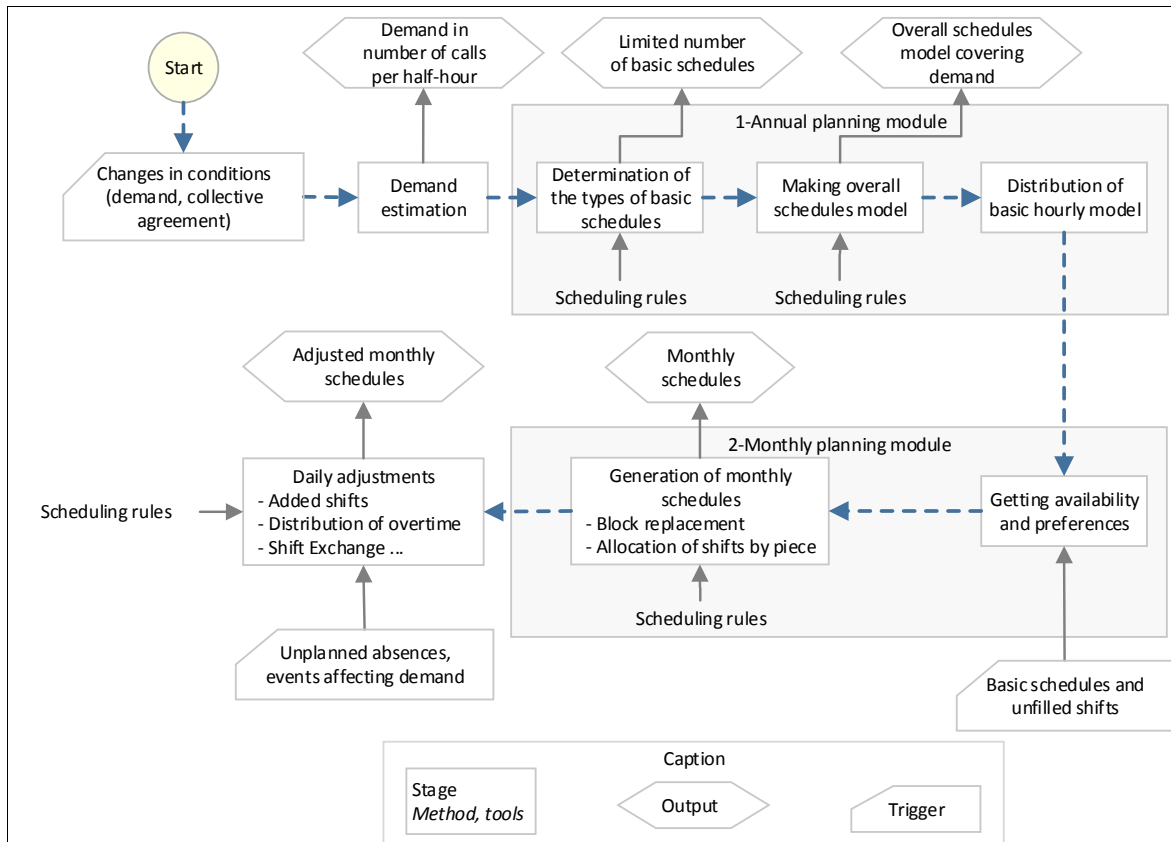


Figure 5.7 Paramedics planning module

Figure 5.7 shows the paramedic planning module. This module aims to optimize this operation, which consists of several stages. It allows for relating each step and identifying their triggers and the resulting output. It integrates the modules of annual and monthly scheduling. The monthly planning module continuously provides some monthly and daily adjustments to take account of unforeseen leaves, unexpected returns to work and sporadic events affecting demand of service (festivals, climate conditions, manifestation, etc.). These modules interact with other modules of absences and leaves management, punctual shifts management and allocation shifts by piece. The next section presents the optimization methods and data processing of IGAP.

5.4 Optimization methods and data processing in IGAP

There are several categories of optimization methods, and each one has advantages and disadvantages. It is therefore important to review the most used to make an informed choice regarding the adequate method, depending on the nature of the problem to be solved. Among them are constraint programming, mathematical programming, heuristics, meta-heuristics, hyper-heuristics and hybrid methods. In the literature, we found a set of articles that addresses optimization problems of PES. Each article addresses a very specific issue of this area. In Tableau 5.4, we have presented an example of the most encountered optimization methods in the literature and their applications. At this level, it is very difficult to identify a single optimization method to solve the PES planning problem, which consists of a set of sub-problems: paramedic scheduling, allocation of vehicles, management replacements, management special events, etc. However, IGAP proposes a process (for each resolution model) to select, associate and validate an appropriate optimization method with a sub-problem. Figure 5.8 presents this process. This process begins with the identification of the problem. Then comes the selection of a suitable optimization method to solve it. Thereafter, we proceed to the evaluation and validation of this choice. The last step is decision making as to whether to maintain this method or not. The following para-graphs show some models and grids for the selection of optimization methods.

Tableau 5.4 Example of optimization methods in prehospital emergency services

Reference	Area of PES	Problem	Optimization Method
(Karakatic et al., 2015)	Vehicle Management	Multi-depot vehicle routing problem	Genetic algorithms
(Wilson et al., 2013)	Personnel management	A multi-objective combinatorial model of casualty processing in major incident response	Constructive heuristic
(Toro-Díaz et al., 2013)	Vehicle management	Joint location and dispatching decisions for	Integer programming

		Emergency Medical Services	
(Chennaoui and Paquet, 2014)	-Personnel management -Vehicle Management	Paramedic scheduling	-Adapted linear programming -Constraints programming
(Schmid, 2012)	Vehicle Management	Solving the dynamic ambulance relocation and dispatching problem	Approximate dynamic programming
(Talarico et al., 2015)	Vehicle Management	Problem of Routing for disaster response with patient groups	Metaheuristic solution approach
(Billhardt et al., 2014)	Vehicle management	Allocation of ambulances to patients problem	Bertsekas' optimization algorithm
(Ibri et al., 2012)	Vehicle management	A decentralized distributed solution approach based on MAS for the real-time emergency vehicle allocation problem	-Parallel ant -Tabu heuristic
(Gabdulkhakova and Konig-Ries, 2011)	Vehicle management	Rational resource allocation problem in emergency situations	Heuristic algorithms
(Maleki et al., 2014)	Vehicle management	Redeployment of ambulances	Maximal Expected Coverage Relocation Problem
(Soto et al., 2013)	Personnel management	Nurse and Paramedic Rostering problem	Constraint Programming
(Livingston et al., 2010)	Demand management	Determining necessity of emergency medical service	Prehospital intervention

		units	probability score
--	--	-------	-------------------

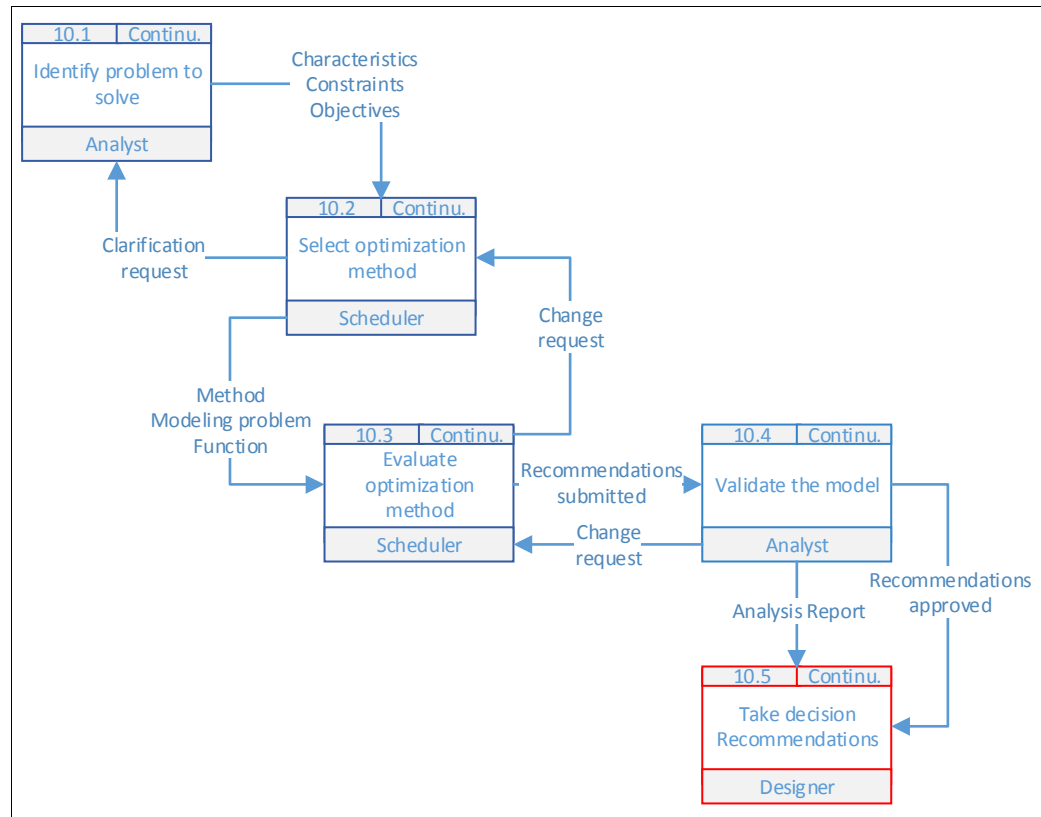


Figure 5.8 Selection and validation process of the optimization method in IGAP

5.4.1 Optimization methods in IGAP

This section aims to help designers select, for each sub-problem, the best adapted optimization method to use to solve it. For example, we can integrate linear programming in the agents responsible for the paramedic scheduling, tabu search in the agents responsible for the localization of paramedic breaks and constraint programming in the agents responsible for the management of replacements, etc. IGAP proposes the following matrix in Tableau 5.5 to define, for each process or agent, an optimization method (or combination of methods) to achieve the defined objective of the problem studied:

Tableau 5.5 Matrix of optimization models
(link between optimization method and process)

	G.1 Optimization of paramedic scheduling	G1.1 Creation of cycles to use	G.1.2 Optimization of the insertion of paramedic breaks
P.3.1 Scheduling of full-time paramedics	M1: Linear Programming	-	-
P.3.2 Scheduling of part-time paramedics	M1: Linear Programming	-	-
P.3.3 Creation of the cycles	-	M2: Constraint Programming	-
P.3.3 Integration of meal breaks of paramedics	-	-	M3: Tabu search

After validation of the chosen optimization methods, it is necessary to identify the objective function, parameters and decision variables (VD) for each of these models, as illustrated in Tableau 5.6 and Tableau 5.7.

Tableau 5.6 Matrix of an optimization model definition

Objective of the model M1	
Minimize the sum of the costs related to schedules and the sum of the costs associated with the management of the fleet of vehicles.	
Parameters	Decision variables
-Parameter 1: NBQ_i	-Variable 1: $X_{ijk} \begin{cases} 1 & \text{if pair } i \text{ starts at shift } j \text{ at moment } k; \\ 0 & \text{else;} \end{cases}$

-Parameter 2: D_l	-Variable 2: $Q_{imk} = \begin{cases} 1 & \text{if pair } i \text{ starts at day shift } m \text{ at moment } k; \\ 0 & \text{else;} \end{cases}$
-Parameter 3: $VMAX$	-Variable 3: $R_{ink} = \begin{cases} 1 & \text{if pair } i \text{ starts at evening shift } n \text{ at moment } k; \\ 0 & \text{else;} \end{cases}$
-Parameter 4: P_v	-Variable 4: $S_{io k} = \begin{cases} 1 & \text{if pair } i \text{ starts at night shift } o \text{ at moment } k; \\ 0 & \text{else;} \end{cases}$
-Parameter 5: P_h	-Variable 5: E_l , difference between the demand and supply in period l if it is positive.
-Parameter 6: P_{ijk}	-Variable 6: H_l , buffer variable that penalizes the objective function when too many shifts begin in the same period l (scatter variable).
-Parameter 7: C_l	-Variable 7: V , number of additional vehicles required to cover the demand.
-Parameter 8: B_l	

Tableau 5.7 Grid of an objective function definition

Objective function	
Minimize:	
$P_v * V + \sum_l [(C_l * E_l) + (P_h * H_l)] + P_{ijk} * \sum_i \sum_j \sum_k (X_{ijk}) \quad (2.1)$	
Constraints	
$E_l + \sum_{ijk} X_{ijk} \geq D_l \quad \forall X_{ijk} \in \Omega_l, \forall l \in L \quad (2.2)$	
$-V + \sum_{ijk} X_{ijk} \leq VMAX \quad \forall X_{ijk} \in \Delta_l, \forall l \in L \quad (2.3)$	
$\sum_k X_{ijk} = 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.4)$	
$X_{ijk} = Q_{imk} \quad \forall i \in I, \forall j \in M, \forall k \in K \quad (2.5)$	
$X_{ijk} = R_{ink} \quad \forall i \in I, \forall j \in N, \forall k \in K \quad (2.6)$	
$X_{io k} = S_{io k} \quad \forall i \in I, \forall o \in O, \forall k \in K \quad (2.7)$	
$Q_{imk} = Q_{i(m-1)k} \quad \forall i \in I, \forall m \geq 2, \forall k \in K \quad (2.8)$	
$R_{ink} = R_{i(n-1)k} \quad \forall i \in I, \forall n \geq 2, \forall k \in K \quad (2.9)$	

$S_{io k} = S_{i(o-1)k} \forall i \in I, \forall o \geq 2, \forall k \in K \quad (2.10)$
--

The first part of this table is used to identify (textually) the objective of the optimization model. In the second part, we define the parameters and decision variables. The third part contains the mathematical modeling of the objective function. The fourth and final part defines the constraints of the objective function. The following section presents the data processing in IGAP.

5.4.2 Data processing in IGAP

The data processing is a very important operation in IGAP. It is the process that extracts relevant information from the raw data. This process is essential to ensure high precision and good quality of results. It depends on these activities:

- Data definition;
- Strategies of identification, extraction, validation and data processing;
- Tools and strategies of the data storage strategy;
- Strategies of the exchange and communication of data between the different actors and processes;
- Protocols and mechanisms for changing and updating data.

Figure 5.9 shows the different stages of this process as proposed by IGAP. This process consists of five main stages. The quality of the data obtained depends on the quality of the mechanisms and tools used by the designer in each operation of this process. The following matrix in Tableau 5.8 shows an example of the data definition operation, their sources and the processing to be performed for each parameter used.

It is obvious that having the right information at the right time helps in making good decisions. Depending on the context and the environment studied, we can also integrate ETL (Extract, Transform, Loading) tools to facilitate the data processing operation and transaction processing tools (OLTP) to facilitate the updating and modification of data in real time. An entity-relationship model is frequently used to develop the data template of the OLTP

systems. This data processing operation is very important in the performance of multi-agent systems for prehospital emergency services. The flows of acquisition, validation, presentation and data exchange between different agents and processes should be defined to ensure high quality of the proposed solutions.

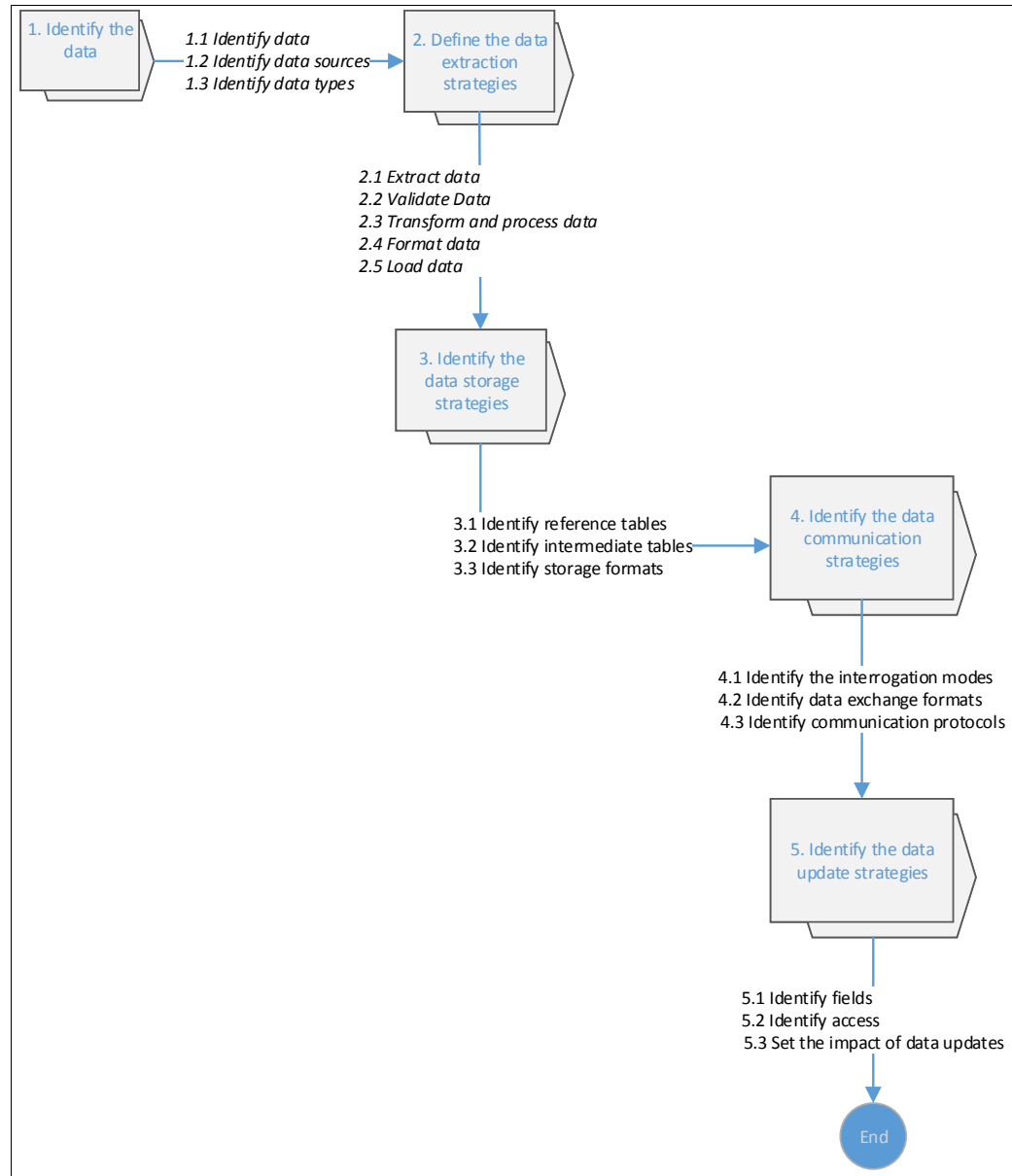


Figure 5.9 General workflow of data processing in IGAP

Tableau 5.8 Matrix of parameters

Parameter	Data	Sources	Processing
Parameter 1: NBQ_i	Number of shifts of employee i	Table: tb_parameters Field: valNbrShift	-
Parameter 2: D_l	Demand in the period l	Table: tb_demand Field: valDemand	The average demand for each day of the week.
Parameter 3: $VMAX$	Maximum number of available vehicles in the fleet	Table: tb_parameters Field: valTotalVehicule Field: valVehOut	The total number of vehicles - the number of output vehicles.
Parameter 4: P_v	Associated cost of adding n additional vehicles	Table: tb_costs Field: costAddVehicule	Cost multiplied by 1000.
Parameter 5: P_h	Associated cost of creating a surplus shift at a certain time	Table: tb_costs Field: costAddShift	Cost multiplied by 1000.

5.5 Discussion

This new approach is the result of our research work in one of the major corporations of PES in North America where we must find a global and integrated solution to the problem of planning of PES. In this study, we used IGAP and O-MASE to develop an optimization model and to design and implement architecture based on MAS (presented in the Article#3 – Chapter 4) to solve the problem of PES. This approach has helped us to define the objectives and key processes (51 processes mapped) of the proposed system, their interactions, etc. The architecture and the proposed model allow for satisfying several constraints, meeting demand, meeting the response time and reducing the number of vehicles used.

5.6 Conclusion

In conclusion, this paper presents an overview of MAS applied to PES and proposes a new global and integrated approach for its resolution called IGAP. We have tried to give a critical view of the limitations of the research work presented. In our opinion, the approach provides good solutions with good results but is limited to a portion of this study area. In other words, many studies focus on only part of the problem of PES and are limited to a single horizon of resolution. This problem can cause reduced performance of the solutions when applied in a real context. The IGAP approach proposed in this document is based on the integration of the main processes of PES in one architecture to improve the overall performance of the system. IGAP is based on MAS for the performance offered by this type of system regarding communication, system interactivity, autonomy of agents and collaboration. This approach could be extended in order to integrate processes that bind PES institutions with hospitals and other health facilities.

CHAPITRE 6

ARTICLE 2 : SCHEDULING MODEL FOR PREHOSPITAL EMERGENCY SERVICES

Adil Chennaoui et Marc Paquet

Département de génie de la production automatisée, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article soumis à l'*European Journal of Operational Research*. Décembre 2014.

Résumé

Les situations d'urgence peuvent affecter et mettre en péril la santé et la sécurité physique des citoyens. D'où la nécessité d'évaluer et de coordonner la surveillance appropriée des interventions visant à minimiser la duplication des efforts et à fournir des services de qualité à la population.

Dans ce contexte, cet article traite la problématique de la planification des services préhospitaliers d'urgence (le cas des techniciens ambulanciers). Nous proposons pour sa résolution un nouveau modèle suffisamment flexible afin de produire un système utilisable sur des ordinateurs de bureau tout en étant fréquemment utilisé pour évaluer un large éventail de scénarios.

Le processus d'optimisation est composé de deux parties principales et la méthode de résolution est fondée, d'une part sur la programmation linéaire adaptée et d'autre part sur la programmation par contraintes et une combinaison d'autres algorithmes. Ce modèle est testé dans un contexte réel et les résultats sont prometteurs en termes de réduction des coûts, de satisfaction des contraintes et de temps de résolution.

Abstract

An emergency situation, which appears as a threat that can affect and imperil the health and physical safety of citizens, warrants a quick and efficient response. It is essential to evaluate and coordinate the appropriate surveillance of interventions to minimize duplication of effort and to provide quality services to the population. In this context, this article deals with the problem of prehospital emergency services scheduling (the case of paramedics). We propose for its resolution a sufficiently flexible new model to produce a usable system on desktop computers and to be used frequently for evaluating a wide range of scenarios. The optimization process is composed of two main parts, and the resolution approach is based, firstly, on adapted linear programming and, secondly, on constraint programming and other evaluation algorithms. This model is tested in a real context, and the results are promising in terms of cost reduction, constraints satisfaction and time resolution.

Keywords - Planning, scheduling, optimization, decision support, simulation.

6.1 Introduction

"Scheduling" is a term covering a wide range of research. Personal scheduling is just one of the various branches of "scheduling". Ernest et al. (2004a) has identified more than 600 scientific articles in this field. However, very few articles on personal scheduling affect ambulance services staff or even emergency services in general (for example: police, fire, etc.) (Güler, 2013; Brunner et al., 2012; Cabreraa et al., 2011; Smet et al., 2013; Bergha et al., 2013).

By doing a quick survey of the literature, it can be noted that there are over 100 articles that address nurse scheduling problem (there is some similarity with paramedics scheduling problem) that have been identified by Ernest et al. (2004b). This is an indication of the specificity of each problem to make schedules, as well as the difficulty of adapting an existing model to a new problem. The models are generally specific to each situation. And to our knowledge, only one article, i.e., Ernest et al. (1999), studies the paramedics scheduling. More than a dozen other articles discuss "ambulance scheduling", but they focus on other

problems such as the positioning of vehicles in the territory (Phung et al. 2013; Coster et al., 2013; Gates et al., 2013; Knight et al., 2012).

In this case study, paramedics work continuously for 24 hours / 7 days. Some of them work full time (FT), others part-time (PT). Some have regular jobs with strict working conditions, others do not. To cover a large territory, the vehicles have only three deposits. Paramedics do not have the same skill levels. Work rules are governed by a relatively complex and strict collective agreement but also by several work habits deeply rooted in the culture of the company and therefore difficult to change. In addition, schedules are made to implicitly take into account the management of the vehicles.

Generally, the preparation of the paramedics' grids of work is performed in a semi-automatic way using tools that require a large number of manual interventions. Given the complex nature of those tasks, this process is managed full-time by a department of a dozen employees and requires both considerable time and significant effort. The planner is responsible for ensuring the normal operation of prehospital emergency services and the best possible working conditions for personnel while respecting the request of ambulance transport and the management costs (in terms of working hours and available vehicles).

To optimize this complex operation, this paper proposes a new interactive model to significantly and effectively reduce the time of the preparation of schedules for paramedics. This model is translated into a system consisting of two main parts. The first part is an algorithmic component incorporating the "set covering" (Dimitri et al., 2013) and the constraint programming (Climent et al., 2013). The second part is a human-machine interface (HMI), which facilitates the user's ability to intervene in the resolution process and visualize the results. This system has been tested in one of the most important North American prehospital services corporations, called US, which covers more than 2.1 million inhabitants on an area of 750 km² (ISQ, 2013). The results of these tests are presented with real data related to scheduling paramedics for the year 2013.

6.2 Definition of Paramedics Scheduling Problem

Personal scheduling is a very complex problem to model and solve. In fact, this problem has a combinatorial nature and several conflicting constraints. Solving a paramedic scheduling problem is equivalent to specifying the number of paramedics, vehicles, work days, days off, and the duration of working days and lunch-breaks for each employee. A permanent service of 24 hours per day and 7 days per week must be assured.

The paramedics are grouped into pairs on each vehicle, and each pair of paramedics has the same schedule for the full duration of a working shift. Pairs of paramedics are always assigned to a vehicle. Thus, the problem to solve is a scheduling problem for pairs of paramedics and implicitly takes into account the management of vehicles. This allows us to simplify the representation of the problem by simply combining two paramedics for the same line of a schedule.

The problem to solve is very complex given the great number of paramedics for which the schedule must be prepared, as well as the number of shifts possible for a single pair of paramedics. Indeed, in a real context, such as the US, there are over 500 paramedics, i.e., more than 250 pairs, whose shifts can start almost any time of day, any day of the week.

Consider the following situation: only one shift per day is allowed and the schedule is constrained to have an ergonomic rotation, i.e., the next shift cannot begin earlier than the start time of the previous shift if it is worked the next day. One then obtains the following formula for the size of the space of possible solutions:

$$S = n * \prod_{x=1}^{x=(h-1)} [n - (j \times q \times x)]^p \quad (3.1)$$

With this definition of variables:

- S , the size of the space of possible solutions.
- n , the number of possible shifts beginnings on the horizon.
- h , the number of shifts to assign to an employee on the horizon.

- j , the number of shifts of a schedule that become unavailable due to the addition of a shift in their proximity, i.e., number of periods of the horizon on which it becomes impossible to add a shift.
- p , the number of pairs of paramedics whose schedules must be made.
- q , the number of periods of the horizon occupied by a single shift.
- x , the number of the current shift to insert in the solution.

Assume the following parameters with a discretized modeling to the hour:

- 24 beginnings of possible shifts per day, using a one hour discretization period.
- A horizon of 14 days (336 hours), the shortest time possible to obtain a feasible and implanted solution.
- A workload of 10 shifts on the horizon.
- A maximum of one shift of work per day.
- 8 hours for one standard shift.
- An ergonomic forward rotation.
- A number of pairs of paramedics of 250 (500 paramedics).

With the parameters outlined above, the variables take the following values:

$$n = 336; h = 10; j = 3; p = 250; q = 8.$$

These parameters correspond approximately to a real instance of the problem. Indeed, with the parameters outlined above, one obtains a size of the space of possible solutions of approximately:

$$S = 1 \times 10^{11500} \quad (3.2)$$

The size of the space of possible solutions for a problem instance is huge. Because it has only a few minutes to resolve the problem (to be usable in a real context), a heuristic (and even a meta-heuristic) could explore a very small part of the solution space. Therefore, it is concluded that the problem must be decomposed. Before discussing the approach of

decomposition to solve this problem, here is a list of the essential characteristics of this problem:

- Creation of individual schedules for each pair of paramedics.
- Takes into account the preferences of pairs of paramedics.
- Possibility of full-time and part-time schedules.
- Uses different shifts: 8 hours, 10 hours and 12 hours, etc.
- Uses different cycles: 6 working days of 14, 7 working days of 14, 8 working days of 14 and 10 working days of 14, etc.
- Integration of operational constraints.
- Integration of financial constraints.
- Integration of ergonomic constraints.
- Allows only one full shift per day per employee.
- A half-hour discretization for the start-time of shifts and breaks.

Possible start-time of shifts is 05:00 at the earliest and 23:30 at the latest. For each schedule, a start-time of the meal-break is precisely assigned; the paramedic collective agreement stipulates that "the meal-break must be given within plus or minus one hour before or after the shift median". The conflicting nature of the constraints of the problem naturally led us to divide them into two types: difficult and flexible constraints, which can be violated, but only minimally.

6.3 Problem solving approach

Following an analysis of the structure of the problem and its characteristics, the choice was to decompose the problem into two steps: 1) creation of database of schedules' patterns and 2) solving the model.

6.3.1 The first step: database of schedules' patterns

This first step permits the creation of a database of scheduling models from a fusion of two distinct elements: cycle and day.

Cycle: determines the workdays over a given period of a certain number of weeks (usually two weeks, or 14 days, beginning on a Sunday). A module, developed by constraint programming, enables the automatic and dynamic generation of different possibilities of cycles while respecting a set of constraints defined by the user (for example: the number of weekends off, the number of working days per week or per cycle, etc.). Tableau 6.1 shows the possibilities of cycles generated by this module for a type of cycle 10/14 (that is to say: 10 work days to 14 days) while respecting certain rules, such as having one weekend off every two weeks.

Tableau 6.1 Example of cycles “10/14”

Cycle number	Banned (Night)	Cycle (BIN)
1014000000	No	11110100111101
1014000001	No	01111100111110
1014000002	No	01110111011110

Tableau 6.1 shows a part of the cycles generated, where it can be observed that the cycle number and cycle are written binary format. The first cycle of this Tableau 6.1 is: 11110100111101. This cycle discredits the days in the system as described in Tableau 6.2. The first column of Tableau 6.2 represents weeks, the second column represents days and the third column represents the occupancy rate. This rate equals 1 if it is a working day and equals 0 if it is a day off.

Tableau 6.2 Details of the cycle 11110100111101

Week	Day	Occupancy
1	Su	1
1	Mo	1
1	Tu	1
1	We	1
1	Th	0
1	Fr	1

1	Sa	0
2	Su	0
2	Mo	1
2	Tu	1
2	We	1
2	Th	1
2	Fr	0
2	Sa	1

Day: determines the working half-hours during some day. This model allows for the automatic generation of all the day's possibilities with their occupancy rates according to the hours of possible breaks and shifts of non-availability of vehicles. There may be several types of days: a typical 8-hour working day, a typical 10-hour working day and a typical 12-hour working day, etc. Tableau 6.3 shows a typical 12-hour day of work.

Tableau 6.3 Example of a 12-hour working day

Start time	End time	Start break
06:30:00	18:30:00	11:00:00
06:30:00	18:30:00	11:30:00
06:30:00	18:30:00	12:00:00
07:00:00	19:00:00	11:30:00
07:00:00	19:00:00	12:00:00
07:00:00	19:00:00	12:30:00
07:00:00	19:00:00	13:00:00
07:30:00	19:30:00	12:00:00

Tableau 6.3 shows a sample of a 12-hour working day generated by this system, with 4 possibilities of breaks for each start time. Tableau 6.4 presents the details of a working day, discredited to the half-hour, over a period of 24 hours.

Tableau 6.4 Details of a work day with 12 working hours

Hour	Half-hour	Occupancy
5	0	0
5	1	0
6	0	0
6	1	1
7	0	1
7	1	1
8	0	1
8	1	1
9	0	1
9	1	1
10	0	1
10	1	1
11	0	0
11	1	0
12	0	1
12	1	1
13	0	1
13	1	1
14	0	1
14	1	1
15	0	1
15	1	1
16	0	1
16	1	1
17	0	1
17	1	1
18	0	0.5
18	1	0
19	0	0
19	1	0

Tableau 6.4 presents the details of a 12-hour working day, from 06:30 to 18:30, with a pause of 60 minutes starting at 11:00. The first column represents the hours. The second column represents the half-hours for one hour; 0 represents the first half-hour and 1 the second half hour. The third column represents the occupancy rate; 1 represents a 100% occupancy of a half-hour and 0 represents a 0% occupancy of this half-hour (break). All these data are added into this system via a very precise algorithm. After the creation of cycles and days, the developed module, at this level, enables users to generate a schedules patterns database and to calculate annual cost (in hours) for each schedule, depending on process in Figure 6.1.

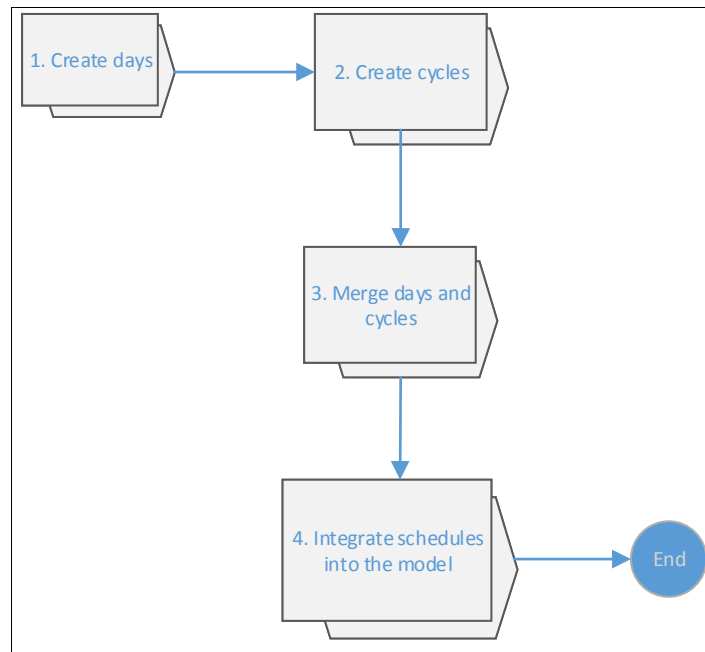


Figure 6.1 Process of creating schedules

In Figure 6.1, the schedules that constitute the database of schedules patterns are obtained with the fusion of cycles and days through the HMI of the system, which has developed the algorithmic components by integrating the constraint programming. This database will be supplied, as required, by new combinations of cycle/day and can be exploited, in whole or in part, for the production of different scenarios. This module also includes a calculation function of an ergonomic note by schedule.

Note: In this schedules patterns database and for each half-hour of a cycle, the occupation field indicates the status of a vehicle (for example: the schedules model is built on a global cycle of 2 weeks, which include 672 half-hours: 48 half-hours x 7 days x 2 weeks). The occupation is calculated by combining days and cycles; at this time, the occupation of each day is multiplied with its corresponding cycle. The following Tableau 6.5 shows a sample of the schedules patterns database of this model.

Tableau 6.5 Sample of schedules patterns database (cycle: 10/14; day: 8)

Schedule	Cycle	Day
145611430	1014000000	8055(05:30:00-13:30:00)
145611433	1014000000	8070(07:00:00-15:00:00)
145611436	1014000000	8085(08:30:00-16:30:00)
145611439	1014000000	8100(10:00:00-18:00:00)
145611447	1014000000	8140(14:00:00-22:00:00)

Tableau 6.5 contains a chart with three columns. The first column represents the number of schedules, the second column represents the cycles on 14 days, and the third column represents the number of days with their respective start and end times. Each line in this Tableau 6.5 represents a schedule in the schedules patterns database. The first line, for example, corresponds to a schedule of a cycle of 10 working days on 14 days (in this cycle 11110100111101, work is performed on Sunday, Monday, Tuesday, Wednesday, and Friday of the first week and on Monday, Tuesday, Wednesday, Thursday and Saturday of the second week) and 8 working hours per day, from 05:30 to 13:30, with a pause of 30 minutes beginning at 09:30. All schedules are discretized to the half-hour and inserted into this system.

6.3.2 The second step: Problem-solving model

This problem needs the optimization of an objective function and also some constraints. Our approach is based on the application of a linear programming model that solves a problem of coverage called “Set covering”, which selects schedules available from the schedules patterns database to precisely meet the actual demand with precision and to optimize the organization

of the vehicles fleet while respecting operational and financial criteria and ergonomic constraints. All the data of this optimization system, of which the majority represents the constraints of the linear program, columns schedules and results of schedules models previously optimized, are stored in a database.

The first step to make in this approach is to perform the evaluation of the request of an ambulance. This request is estimated from historical data, such as the number of interventions at each moment of the day and the duration of interventions. The results of the analysis are expressed in this model in terms of the number of vehicles required on the entire territory, discretized to the half-hour, for the 7 days of the week. Thus, there are a total of 7 evaluations of request: one for Sunday, one for Monday, one for Tuesday, and so on until Saturday. Effectively, the real demand seems to vary significantly for each day of the week. On the other hand, it also varies greatly from seasons to season. After the execution of the linear program for a schedules model, the result obtained is immediately displayed in the form of statistics and reports of solution, such as graphics of comparison between the supply curve obtained by the solution and the demand curve, a detailed description of schedules, etc.

Constraints definition:

A number of constraints of the model are strict and therefore will not be violated, while others are flexible and their violations will be translated by a penalty cost in the objective function. All these constraints are separated into four categories: union and management constraints, financial constraints, ergonomic constraints and individual preferences constraints. These are all constraints that must be respected or implied by the model displayed in Tableau 6.6.

Tableau 6.6 Constraints of the optimization model

C1: Meet demand
For all half-hours of days: $\text{Schedule} * \text{number of schedules} * \text{occupancy coefficient of the half-hour} \geq \text{Request of the half-hour} + \text{maximum deviation (gap)}.$
C2: Limit of part-time schedules

For all part-time schedules: Part-time schedule * quantity of each schedule \leq maximum number of part-time schedules.
C3: Limit of full-time schedules
Total of schedules - number of part-time schedules = maximum of full-time schedules.
C4: Number of vehicles
Number of active schedules + number of schedules for which the vehicles are not available = maximum of vehicles + number of additional vehicles. A schedule represents two employees; it therefore has two employees by schedule and one vehicle by schedule.
C5: Constraint concerning the type of cycle
This indicates the minimum and maximum limits for the number of schedules of the solution depending on the type of cycle (example of cycle type: 2 working days on 14, 8 working days on 14).
C6: Constraint on schedules groups
This indicates the minimum and maximum limits for the number of schedules in the solution part for some schedules group. A schedules group is a set of schedules having certain common characteristics, regardless of the type of characteristics (you can have an infinite number of groups).
C7: Constraint related to cycles
This indicates the minimum and maximum limits for the number of schedules of the solution by having a certain specific cycle (example of cycle: Monday and Tuesday are working days every week).
C8: Constraint related to schedules
This indicates the minimum and maximum limits for each schedule (example of schedule: a cycle of 4 working days on 14: Mondays, Tuesdays, Wednesdays, and Fridays; with days from 07:00 to 16:00).
C9: Constraint related to starting groups
Lower and upper bounds for the number of schedules that begin at a precise time.
C10: Constraint on days
This indicates the minimum and maximum limits for the quantity of each day (example of a working day: from 07:00 to 16:00).
C11: Constraint related to variance between the service offered from one week to another

This evaluates the difference between the coverage at a certain time of a week and the coverage at the same time of the following week of the cycle. This difference should not be larger than a certain specific value. The demand is assessed individually for all 7 days of the week, but it does not change from one week to the next throughout the year.

According to Tableau 6.6, the problem includes a high proportion of soft constraints and few, really tough constraints (violations of some soft constraints are, however, generally penalized because they are almost never violated in practice).

The optimization model is an integer linear program. This optimizes the selection of the combination of individual schedules introduced in the final schedule. These individual schedules come from all patterns previously produced (schedules patterns database). The user must decide on the individual schedules patterns presented that he considers satisfactory for a solution (selection can be made by cycle-type, day-type, or item). All the constraints are managed through the human-machine interface of the system (maximum number of vehicles, number of part-time and full-time workers, etc.) and stored in the database. The logic of this optimization module is defined as follows:

Modeling and mathematical formulation

The objective function consists of minimizing the sum of the costs related to schedules and the sum of the costs associated with the management of the fleet of vehicles. It is important to note that the costs are not monetary, but rather in terms of the penalties of the level of violations of ergonomic constraints or number of hours for each schedule by year. The more important a violation is, the more expensive the penalty in the objective function will be.

The definition of the terminology is as follows:

Indices:

- I : set of indices of i paramedics
- J : set of indices of j shifts
- K : set of indices of k possible starts time shifts

- L : set of indices of the periods of the horizon l
- M : set of indices m of day shifts
- N : set of indices n of evening shifts
- O : set of indices o of night shifts
- J_m , sub-set of J including only the indices j corresponding to a day shift's m
- J_n , sub-set of J including only the indices j corresponding to an evening shifts n
- J_o , sub-set of J including only the indices j corresponding to night shifts o
- G_l , set of X_{ijk} starting at the time l
- Ω_l , set of X_{ijk} that can meet demand for the time l
- Δ_l , set of X_{ijk} that may require a vehicle at the same period l

Constants:

- NBQ_i , number of shifts by employee i
- D_l , demand on the period l
- $VMAX$, maximum number of available vehicles in the fleet
- P_v , associated cost with adding n additional vehicles
- P_h , associated cost with a beginning of surplus shift at a certain time
- P_{ijk} , associated cost with the undesirability of a shift
- C_l , associated cost with a unit of E_l
- B_l , upper bound of shifts that can begin at the same period l

Decision variables:

- $X_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{if pair } i \text{ starts shift } j \text{ at } k \text{ moment;} \\ 0 & \text{else;} \end{cases}$
- $Q_{imk} = \begin{cases} 1 & \text{if pair } i \text{ starts day shift } m \text{ at } k \text{ moment;} \\ 0 & \text{else;} \end{cases}$
- $R_{ink} = \begin{cases} 1 & \text{if pair } i \text{ starts evening shift } n \text{ at } k \text{ moment;} \\ 0 & \text{else;} \end{cases}$
- $S_{io k} = \begin{cases} 1 & \text{if pair } i \text{ starts night shift } o \text{ at } k \text{ moment;} \\ 0 & \text{else;} \end{cases}$
- E_l , difference between demand and supply in the period l if it is positive;

- H_l , buffer variable, which penalizes the objective function when too many shifts begin in the same period l (scatter variable);
- V , number of additional vehicles required to cover the demand;

This objective aims to:

$$\textbf{Minimize:} \quad P_v * V + \sum_l [(C_l * E_l) + (P_h * H_l)] + P_{ijk} * \sum_i \sum_j \sum_k (X_{ijk}) \quad (3.3)$$

$$\textbf{Subject to:} \quad (C1): E_l + \sum_{ijk} X_{ijk} \geq D_l \quad \forall X_{ijk} \in \Omega_l, \forall l \in L \quad (3.4)$$

$$(C2): -V + \sum_{ijk} X_{ijk} \leq VMAX \quad \forall X_{ijk} \in \Delta_l, \forall l \in L \quad (3.5)$$

$$(C3): \sum_k X_{ijk} = 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.6)$$

$$(C4): X_{ijk} = Q_{imk} \quad \forall i \in I, \forall j \in M, \forall k \in K \quad (3.7)$$

$$(C5): X_{ijk} = R_{ink} \quad \forall i \in I, \forall j \in N, \forall k \in K \quad (3.8)$$

$$(C6): X_{ijk} = S_{io k} \quad \forall i \in I, \forall j \in O, \forall k \in K \quad (3.9)$$

$$(C7): Q_{imk} = Q_{i(m-1)k} \quad \forall i \in I, \forall m \geq 2, \forall k \in K \quad (3.10)$$

$$(C8): R_{ink} = R_{i(n-1)k} \quad \forall i \in I, \forall n \geq 2, \forall k \in K \quad (3.11)$$

$$(C9): S_{io k} = S_{i(o-1)k} \quad \forall i \in I, \forall o \geq 2, \forall k \in K \quad (3.12)$$

$$(C10): \sum_m \sum_k Q_{imk} + \sum_n \sum_k R_{ink} + \sum_o \sum_k S_{io k} = NBQ_i \quad \forall i \in I \quad (3.13)$$

$$(C11): \sum_{ijk} X_{ijk} - H_l \leq B_l \quad \forall X_{ijk} \in G_l \quad (3.14)$$

$$X_{ijk}, Q_{imk}, R_{ink}, S_{io k} \text{ Binary} \quad (3.15)$$

$$H_l, E_l, V \text{ Integers} \quad (3.16)$$

The P_v factor, corresponding to the penalty costs for each additional vehicle, is generally much higher than other factors to represent the cost that actually represents the addition of an additional vehicle to the fleet. The function also minimizes the number of undesirable shifts.

C1 is the constraint with respect to the coverage of demand and constrains the sum of supply and variable gap to be at least equal to the demand. When supply does not meet demand, the E_l variable takes the value of the difference. This value increases the value of the objective function and thus reduces the quality of the solution. The objective of this constraint is simply to cover the best possible demand.

C2 is the constraint with respect to the number of available vehicles. When the offer at any given time requires a larger number of vehicles than is available in the fleet, variable V takes the value of the number of additional vehicles needed. The value of v is always the difference between the number of vehicles required and the number of available vehicles in the fleet for the period for which this difference is maximum. A positive value for this variable greatly degrades the quality of the objective function. C2 therefore highly constrains the solution based on the number of additional vehicles inserted.

C3 limits the sum of indices k for the same i and the same j at 1. Each index k represents a possible movement of shift j of the pair i . This constraint ensures that the shift is moved to one place on the schedule. This constraint prevents inexistent shifts from being added and ensures that existing shifts are eliminated.

C4, C5 and C6 are intermediate constraints used to restrict, respectively, the dependent variables Q_{imk} , R_{ink} and S_{iok} to have the same values as the decision variables X_{ijk} for the corresponding indices. Without these constraints, C7, C8, C9 and C10 cannot operate properly.

C7, C8, C9 and C10 bind all shifts of the same type on a single individual schedule, starting from the same period. These constraints are needed to give acceptable schedules for employees. Indeed, a schedule model where each shift would begin at a different time would be difficult to manage for both supervisors and employees. These constraints thus provide some standardization periods of the start of shifts for each individual schedule. However, it may happen that a shift is slightly offset from the others to avoid the corruption of a day off. However, this does not affect in any way these constraints because the variables are set during preprocessing so that such displaced shifts to protect a day off are considered as one shift starting at the same time as all others (in this case, a number of indices k of X_{ijk} correspond to the same period of shift start, corresponding to a movement as far away as possible so as not to corrupt the day off).

C11 indicates the limit of the number of shifts that can start at the moment l . This constraint is used to scatter, as much as possible, early shifts throughout the horizon. Two objectives are

sought by this constraint: scatter the arrival and departure of vehicles of operational centers to facilitate the management of the vehicle fleet and scatter the moments of the horizon on which meal breaks are due. When the number of shifts starting at time l is larger than the terminal B_l , the objective function is penalized.

The goal defined in the objective function is to minimize the violations of these soft constraints. This is due to the approach that is used, which is more focused on the security of employees to have a certain number of working hours over a specific period of time. It should be noted that all variables can be set via the HMI system, where one can easily see and modify the parameters of the model:

- The cost of each schedule is established by the total working hours during a period of a year (all schedules do not have the same fees).
- The cost of an additional vehicle is set at 1000 (configurable).
- The cost of one unit gap between supply and demand is set at 200.

The gap variable is a buffer. It takes a negative value if demand is greater than the supply service and a positive value otherwise. The solution thus deteriorates if the service offer does not meet the request and improves if the service level is higher than the demand.

6.4 Analysis of scheduling process and methodology

The objective of this work is to obtain a solution applicable in a real context with consideration for the pause. The shifts of the model are variables; the duration of one shift can be 8 hours with 30 minutes of pause, 10 hours with 45 minutes of pause or 12 hours with 60 minutes of pause (rules of the collective agreement). Those shifts can start at 5:00 AM at the earliest and at 23:30 at the latest. All paramedics must have a weekend or two off. The approach aims to apply a well-determined process to satisfy a set of rules and constraints; this process is defined in Figure 6.2.

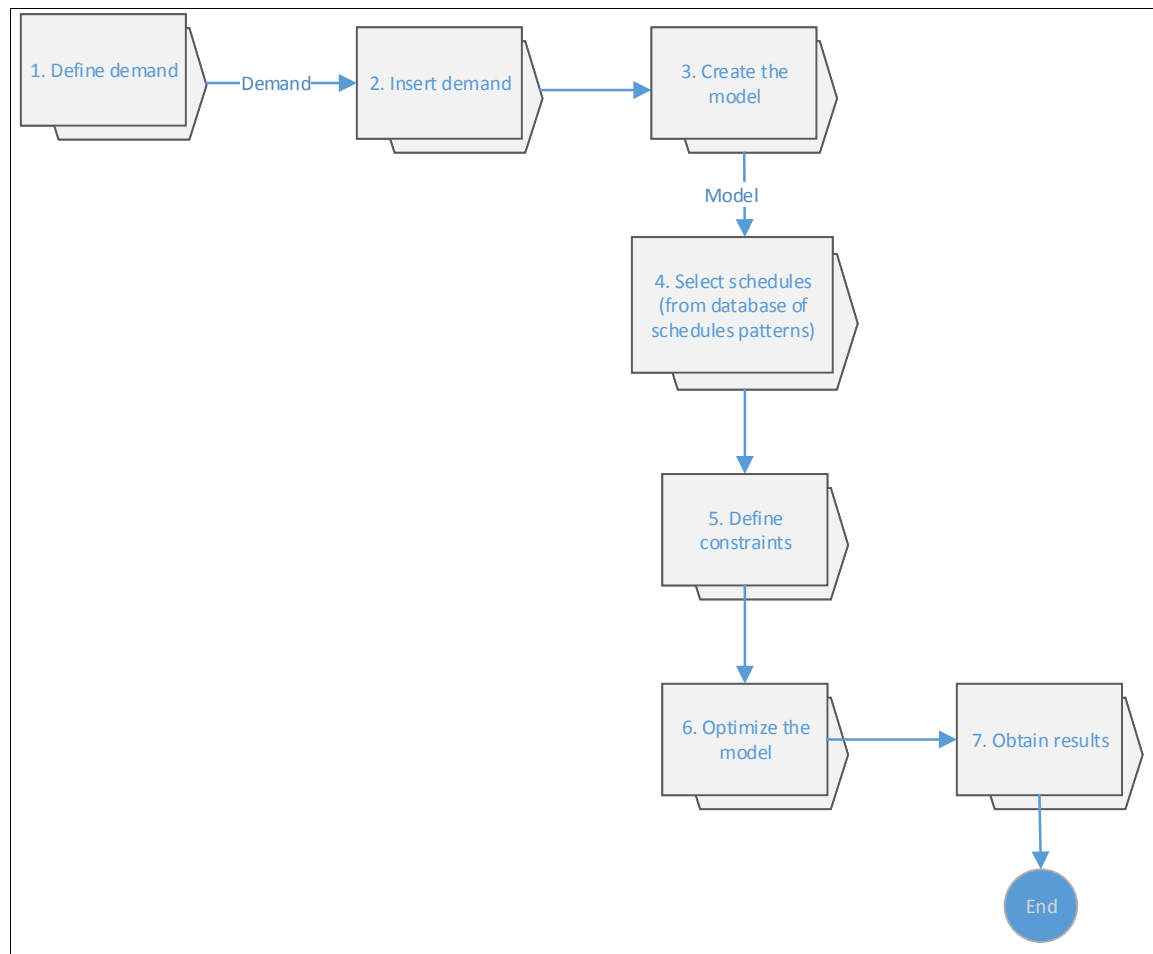


Figure 6.2 Global process of paramedics scheduling

The diagram in Figure 6.2 shows the process of paramedics scheduling. This process begins with the definition of the demand, which constitutes the first constraint to take into account in the optimization model. This request is discretized to the half-hour, and the needs of demand are expressed in number of vehicles. This request must be spread over a total of 672 half-hours, representing two weeks. The creation of the schedules model is the second step in this process. Subsequently, it chooses a selection from a schedules patterns database to integrate into the schedules model. It defines the constraints to add in the model, and, afterwards, the optimization was launched. After running the optimization of schedules model, results are saved in the system and will be automatically displayed as graphics and reports. This process is iterative; the planner can create several scenarios by changing the parameters required to obtain the desired results.

In this process, we have chosen periods of 30 minutes (half-hour) because it does not seem to us that having a discretization of higher precision and a discretization of the half-hour is generally acceptable for a large number of scheduling problems. However, given the system resolution rapidity obtained during the tests, it could be possible to solve it with a finite discretization if the real application context required it. The discretization of half-hour periods must go hand in hand with a selection of the shifts of the solution from the schedules patterns database so that the beginnings of shifts are the best possible spread over the resolution horizon. This spreading is necessary not only to optimize the management of the vehicles fleet to limit the number of vehicles required but also to maximize the coverage of demand, which varies greatly from one half-hour to another during the day.

The first phase of this approach, which consists of the creation of a schedules patterns database, is solved by constraint programming and a set of algorithms translated into software modules. The second phase, i.e., making a schedule, is solved by a mixed linear program. The relatively simple structure of the modeling problem is the main motivation for this choice. In effect, given that this problem can be solved optimally by this method in a very short period of time. The model optimizes the location of each schedule of the solution and locates their pauses to maintain the best possible coverage of the request. Specifically, the objective function minimizes the sum of violations of offer deficiency, surplus in supply, the maximum number of full-time and part-time employees, maximum number of vehicles, vacation applications not respected, and the soft constraints of ergonomics and preference. This approach has tried to respect the quality of the solutions obtained, and the compliance of certain objectives and performance criteria is illustrated in Figure 6.3.

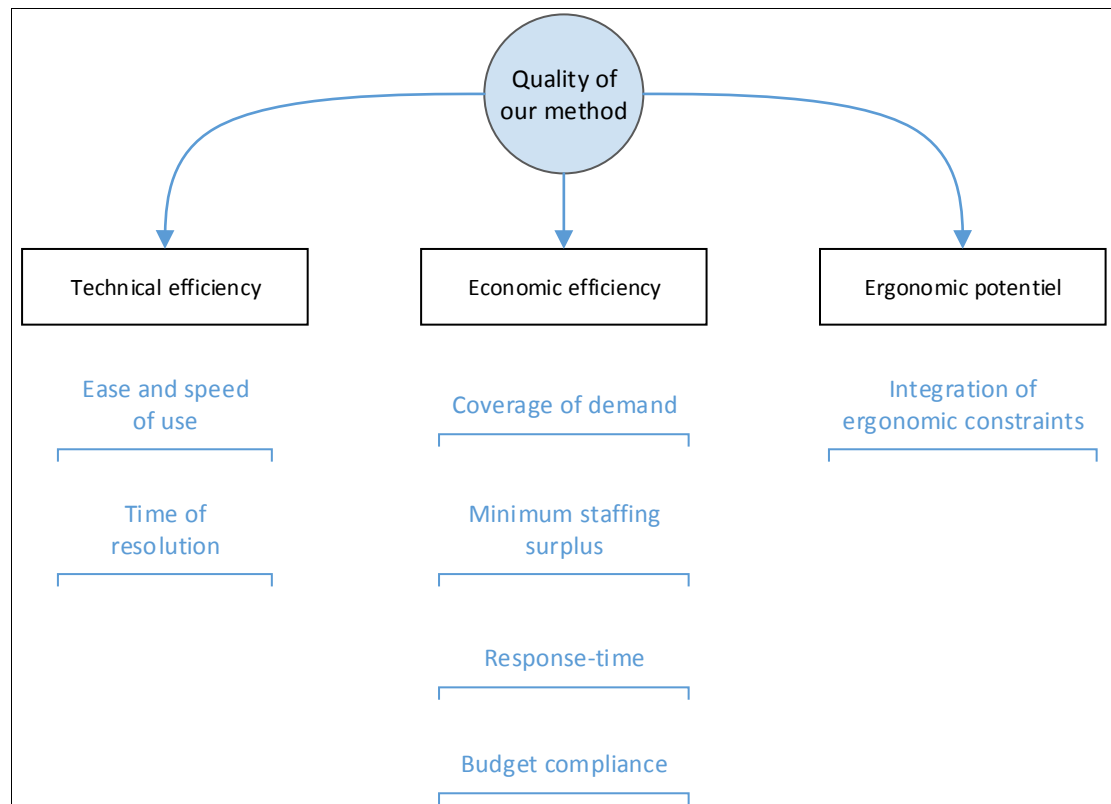


Figure 6.3 Required performance criteria

According to Figure 6.3, three major axes in the confection of schedules have been met:

- **Technical efficiency:** summarized in terms of ease and speed of use, the system is quick and easy to use. In effect, this approach is translated into an intuitive Web application, developed in .NET, and the data are optimized by using a linear program coded in C# that uses the library "oplall.dll" of IBM ILOG OPL IDE. The execution time is relatively fast; obtaining a solution with respecting all the constraints of a real case can take anywhere from approximately few minutes to a certain number of hours, depending on the volume of parameters and selection of schedules patterns that were integrated in the model (for example: 6 minutes for a small selection of a few combinations and 40 minutes for more combinations from the schedules patterns database).
- **Economic efficiency:** according to the tests, schedules models obtained by the system had a very satisfactory response-time and coverage of demand without exceeding

limits of staff defined or vehicles with respect to the number of working hours allowed.

- Ergonomic potential: in this system, a calculation module of an ergonomic note by schedule has been integrated, which will be considered as an optimization cost in the objective function to better observe the ergonomic constraint.

In this system, to improve the quality of the solutions obtained and to better respond to a real context, we have tried to add other optional rules, such as offering the possibility to create groups of schedules to harmonize the beginnings of shifts for a group of paramedics. This operation will show the flexibility of the system and the possibility of improving its functioning in the future. Our technique aims to obtain a good quality of schedules model built by selecting successive schedules from the schedules patterns database.

In summary, the solutions obtained by this system respect all the hard constraints and minimize the number of violated soft constraints. In addition, coverage of request is distributed as equally as possible on the whole horizon of resolution. The following section will present the test results of the scheduling system, the behavior of the algorithm used according to the settings and the quality of the results obtained.

6.5 Numerical results

This section presents the preliminary results obtained by the system. The assessment of the quality of the results is simple to do in regards to certain elements, such as coverage of the request. However, with regards to other items, this evaluation is not simple to do, such as for the quality of the individual schedules. We defined a list of measures that enable the user to evaluate the quality of all schedules. These measures are:

- Number of vehicles-hours
- Number of men-hours
- Number of schedules
- Ergonomic cost
- Number of vehicles

- Number of additional vehicles
- Demand coverage
- Percentage of schedules starting less than 12 h after the previous shifts
- Execution Time
- Number of hours by type of cycle/day

These statistics have been judged to be those necessary and/or useful to be able to assess the quality of schedules, both for the compliance of request, regarding the available number of vehicles, and for the ergonomic level, but especially for its potential implantation at US.

The system contains several parameters. The vast majority of these are included in step of the generation of a schedules patterns database. A module of the confection of schedules model requires a little setting.

The size of the problem has three dimensions: the number of employees, the selection of schedules and the horizon of resolution. A normal instance has a horizon of two weeks (14 days) and between 300 to 400 pairs of paramedics. In these conditions, it is possible to obtain a solution considered satisfactory generally between 10 and 60 minutes of time of calculation on a desktop computer Intel Core Duo CPU E6850 with 3 GHZ and 3.48 GB of RAM. The resolution time is very variable because it strongly depends on the number of constraints and active parameters included in the model to resolve. Generally, the more constraints and settings enabled, the longer the resolution time. The tests performed in the present paragraph are of a size of 298 hours; a schedule for each pair of paramedics (278 schedules full-time and 20 part-time) over a horizon of 2 weeks is shown in Tableau 6.7.

Tableau 6.7 Number of schedules for each test

Number of schedules	Test 1	Test 2	Test 3
Full Time	278	278	278
Part-time	20	20	20
Total	298	298	298

This corresponds to a schedules model for employees of US, where 556 of the 596 paramedics are TC and 40 are TP. For the 3 tests, the system has responded fully to the request of a weekend off for the 596 employees. The constraint of demand coverage forced the offer to be greater than or equal to the demand, where feasible, for all periods of the horizon. When the request cannot be fully covered for a given period, the objective function is penalized. The surpluses of offer are not taken into account because they have no direct negative impact on the quality of the solution. The indirect consequence of a surplus of offers is a misdistribution on the horizon of the beginnings of shifts (causing bottlenecks in the vehicle deposits); thus, there is a need to add additional vehicles to the fleet during peak periods of the oversupply.

The constraint with respect to the number of available vehicles in the fleet is very important for two reasons: first, an increase in the number of vehicles required generally occurs in parallel with an increase in ridership of vehicle deposits, which produces bottlenecks during outings and returns of vehicles. These bottlenecks increase the complexity of the management of the vehicles fleet and reduce the availability of vehicles. Secondly, the cost of adding an additional vehicle is very expensive; it is approximately \$200,000 over five years. This cost does not include the additional charges produced by management problems caused by increasing the size of the fleet and by increasing the ridership of deposits of additional vehicles to the fleet. Ergonomic break is the least penalized criterion in the phase of the generation of the schedules patterns database. Stops criteria of the tests are shown in Tableau 6.8.

Tableau 6.8 Test stop criteria

Criterion	For all tests: Browse 95% of the solution space without improvement of the best known solution.
-----------	---

The stops criteria used during the tests were always set according to the number of iterations without improvement of the best known solution. The main parameters chosen in each test are described in Tableau 6.9.

Tableau 6.9 Parameter list of each test

	Test 1	Test 2	Test 3
Maximum quantity of vehicles	110	115	123
Maximum quantity of additional vehicles	0	2	5
Part-time	20	20	20
Full Time	278	278	278
Schedules	Selection	Selection	All
Cycle	1	1	1
Cost of additional vehicle	1000	1000	1000
Weight of surplus gap	200	200	200
Type of cycle	<ul style="list-style-type: none"> • 6 Days on 14 • 7 Days on 14 • 8 Days on 14 • 10 Days on 14 		
Type of day	<ul style="list-style-type: none"> • 8 Hours • 10 Hours • 12 Hours 		
Start time of shifts	From 05:00 at the earliest to 23:30 at the latest		
Schedules	<ul style="list-style-type: none"> • All schedules of 10 work days on 14 with a weekend off every two weeks and 8 working hours per day with 30 minutes breaks. • All schedules of 8 work days on 14 with a weekend off every two weeks and 10 working hours per day with 45 minutes of breaks. • All schedules of 7 workdays on 14 with a weekend off every two weeks and 12 working hours per day with 60 minutes of breaks. • All schedules of 6 work days on 14 with a weekend off every two weeks and 10 working hours per day with 45 minutes of breaks. 		

Tableau 6.9 summarizes the main parameters of the 3 tests that were performed during the making of 3 scenarios of schedules models. It should be noted here that the constraints in relation to the groups of schedules or to the limits of certain schedules or types of schedules have not been used. Figure 6.4 presents the execution time of each test. Figure 6.5, Figure 6.6 and Figure 6.7 show that the solutions generated by our system for each test have a good coverage of demand compared to the offer (analysis of results in APPENDIX IV).

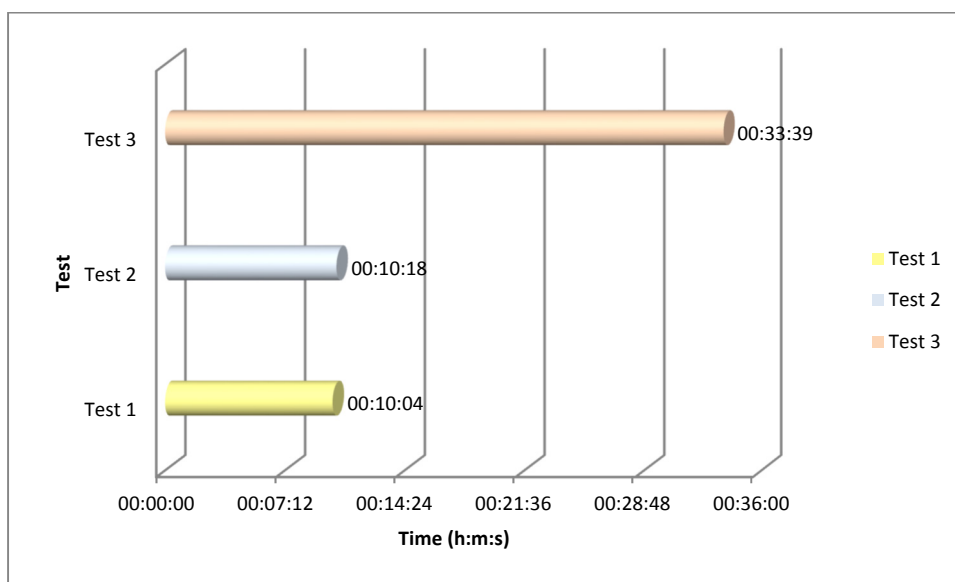


Figure 6.4 Execution time of each test

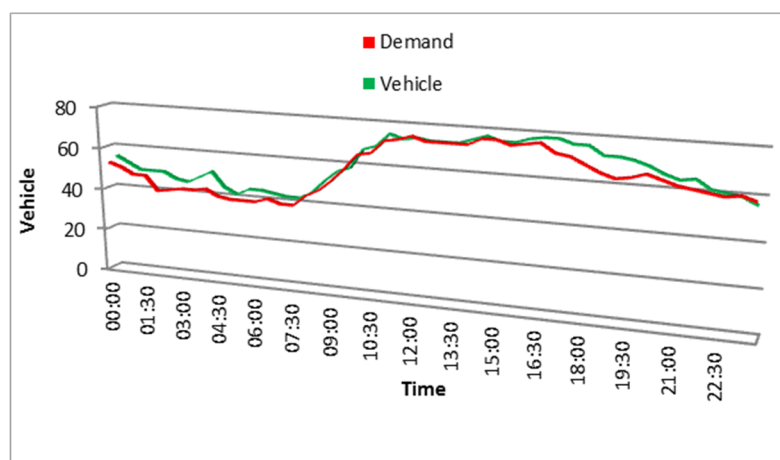


Figure 6.5 Comparison between offer and demand for test 1 (Saturday)

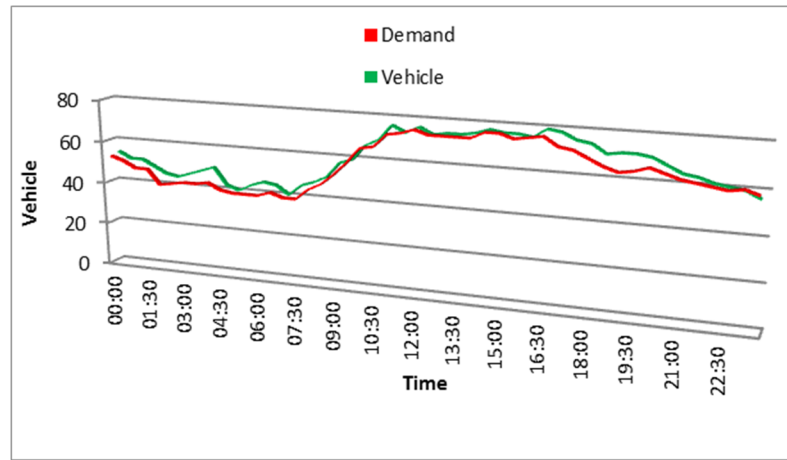


Figure 6.6 Comparison between offer and demand for test 2 (Saturday)

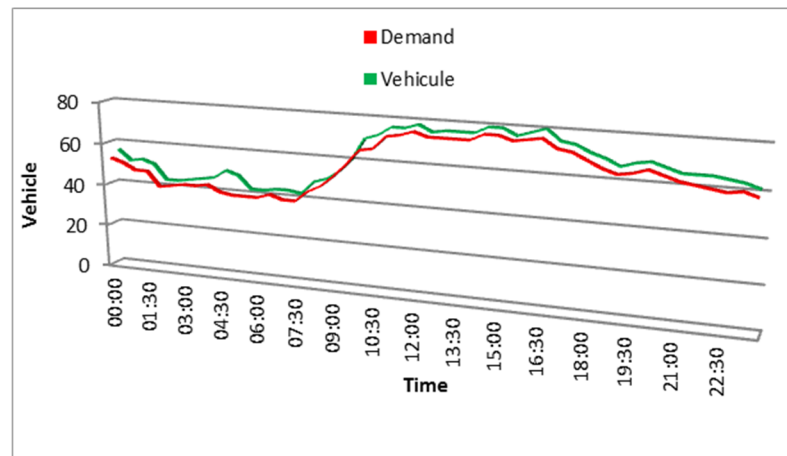


Figure 6.7 Comparison between offer and demand for test 3 (Saturday)

The execution time is different for each test; by changing a few parameters, for example, the maximum number of vehicles in test 3, a greater number of schedules patterns was added compared to test 1 and test 2. Figure 6.8 presents the distribution of results for the 3 tests depending on the type of schedules.

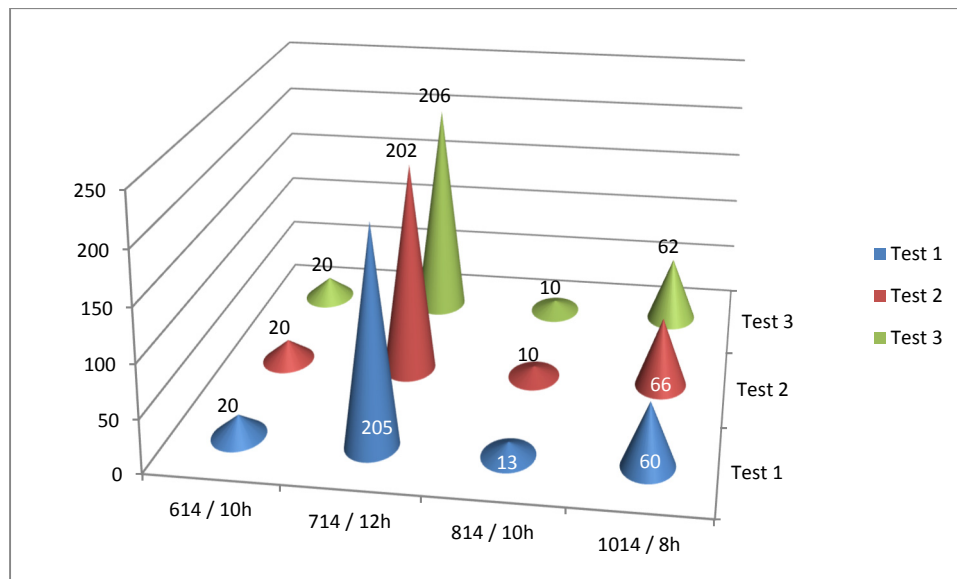


Figure 6.8 Distribution of schedules for the 3 tests

These results are presented in detail in the system, by solution, in form of a description report of schedules. Tableau 6.10 shows a part of this report.

Tableau 6.10 Description report of schedules

Combination	Start	End	Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Break
814 - 10h	05:00:00	15:00:00	1	Su			W	Th			Su	M	Tu			F	Sa	08:30:00
714 - 12h	05:00:00	17:00:00	1		M	Tu			F	Sa	Su			W	Th			10:00:00
714 - 12h	05:00:00	17:00:00	2		M	Tu			F	Sa	Su			W	Th			09:30:00
714 - 12h	05:00:00	17:00:00	2	Su			W	Th				M	Tu			F	Sa	09:30:00
1014 - 08h	05:30:00	13:30:00	1	Su	M	Tu		Th	F			M	Tu	W	Th		Sa	09:30:00
714 - 12h	05:30:00	17:30:00	5		M	Tu			F	Sa	Su			W	Th			10:00:00
714 - 12h	05:30:00	17:30:00	5	Su			W	Th				M	Tu			F	Sa	10:00:00

The summary of other results is presented in Figure 6.9. The main strength of the method is a speedy resolution of the linear program because it must select schedules to insert in the solution among a sample by taking into account the various types of schedules. In the short term, we see SYSCONF as an excellent tool for the simulation of scenarios, changes and improvements of current structures and processes of scheduling at US. To conclude, the following section will present the avenues for improving the SYSCONF system.

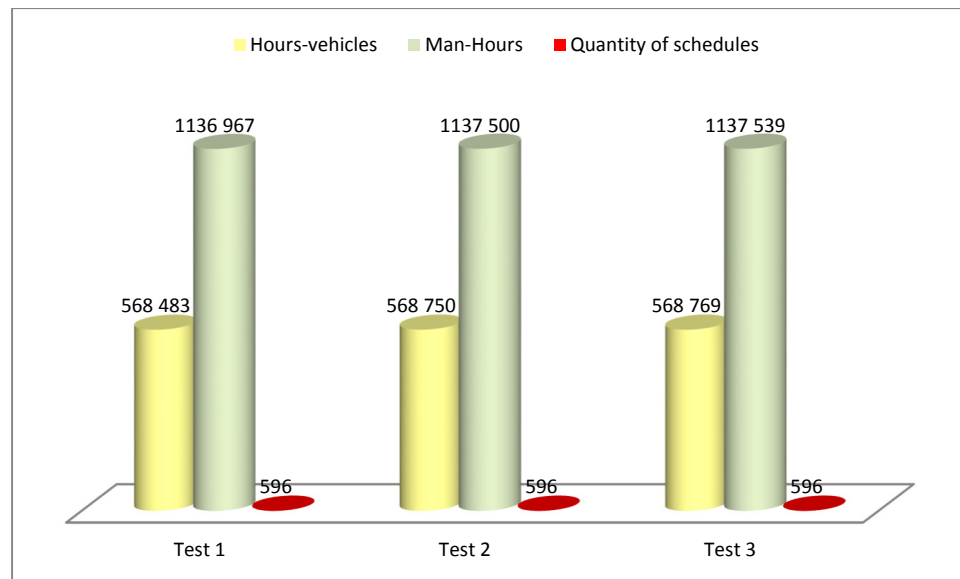


Figure 6.9 Other test results

6.6 Conclusion and perspective

The objective of this paper was to simply produce high quality schedules that can respond to the majority of the organizational and operational constraints of paramedics. In our view, this objective is achieved and the model quickly provides good solutions on desktop machines; its flexibility allows for testing and evaluating a very large number of scenarios without ever having to manually create schedules patterns. Schedules created are ergonomical and easily meet demand when the number of employees is sufficient. In addition, the management of vehicles is performed effectively, thus limiting the costs associated to the additional acquisition of vehicles (knowing that each unused vehicle allows for savings of \$200,000 over 5 years). This system is also performs well in terms of the execution time necessary to make schedules. Future research should be carried out to add optimization components of distribution shifts by operational center, the replacement planning and the management of special events.

CHAPITRE 7

ARTICLE 3 : MULTI-AGENT DECISION-MAKING SUPPORT MODEL FOR THE MANAGEMENT OF PREHOSPITAL EMERGENCY SERVICES

Adil Chennaoui et Marc Paquet

Département de génie de la production automatisée, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article publié dans *International Journal of Machine Learning and Computing*,

Volume 4, Issue 2, 2014

DOI: 10.7763/IJMLC.2014.V4.412

Résumé

Cet article porte sur le thème de la modélisation et de l'aide à la décision dans le cadre des systèmes complexes. Plus précisément, nous sommes intéressés aux systèmes multi-agents. Ces travaux (réalisés en collaboration avec l'une des corporations les plus importantes en services préhospitaliers d'urgence au Canada) sont appliqués à la conception d'un système d'aide à la décision dédié à la gestion des SPU, un modèle à base d'agents réactifs et une architecture générique du système sont proposés. Ce modèle permet de présenter une nouvelle approche de gestion et d'optimisation plus efficace des services préhospitaliers d'urgence tout en intégrant ses différentes composantes, touchant à la fois la planification des horaires, la gestion des remplacements, la gestion de la flotte de véhicules, la gestion de la capacité des dépôts, la couverture de la demande et la gestion des événements spéciaux.

Abstract

This article focuses on the theme of modeling and that of decision-making support in complex systems. We are interested more precisely in multi-agent decision-making support models. This work, conducted in collaboration with one of the most important Canadian prehospital services corporations, i.e., US Corporation, is applied to the design of a decision-making support system dedicated to the management of prehospital emergency services. For this system, we propose a model based on reactive agents and a generic architecture.

Keywords— Decision-making support, multi-agent system, planning, prehospital emergency services, simulation.

7.1 Introduction

The complexity of artificial systems and the critical importance of a better understanding of the complexity of natural systems require the development of new approaches of problems modeling and their resolution (Slotine, 2013). In this article, we are interested in designing decision-making support systems of prehospital emergency services. To construct and analyze multi-agent models, we have appealed for the knowledge of the expert.

The modeling based on agents is one of the most popular modeling techniques due to the richness of the agent paradigm. It allows for the easy representation of qualitative and quantitative processes and the interaction of heterogeneous entities with various architectures. However, the primary motivation of its use is related to the goal of modeling: understanding the relationship between individual behavior and collective behavior (Treuil et al., 2008). This work is primarily conducted in an application setting related to the problem of the management of prehospital services in the US Corporation. This corporation is responsible for providing prehospital emergency services to over 2.4 million inhabitants in an area of 500 km². It employs paramedics working continuously round the clock, 7 days a week to cover a vast area whose vehicles have only three deposits (Corporation, 2013). An overview of the literature shows that a series of articles deal with the topic of the emergency services management. In summary, each article deals with a very specific problem in this

area, either is vehicles / ambulances management (Shaft and Cohen, 2013; Setzler et al., 2011; Goodwin and Mediolia, 2013) or the demand management in prehospital services (Wong and Lai, 2010; McNeil et al., 2011). To the best of our knowledge, no article deals with the issue of prehospital emergency services management in all these aspects with a comprehensive and integrated resolving approach.

The model that we propose in this article presents a new and a more effective approach of management and optimization of the prehospital emergency services integrating its various components. This approach integrates the scheduling planning, replacements management, vehicles fleet management, the deposits capacity management, the covering of the demand and the management of special events. The solution we propose is composed of two main parts. The first part is a reactive multi-agent model integrating several algorithmic components. The second part corresponds to a decision-making support architecture that facilitates to the user the intervention in the resolution process and the visualization of results. Our model was tested in US Corporation and we will be presenting the results of tests done on real data.

7.2 Prehospital emergency services

In addition to being a part of the continuous service category, prehospital emergency services require a high and consistent quality. From this perspective, both efficiency and responsiveness remain two crucial points of the work performed. Thus, to be able to answer all calls received from paramedics in a limited time (less than 9 minutes for calls of Priority 1 in US), we must have, in station, all the necessary and sufficient resources (paramedics, vehicles, etc.) 24/7. These resources are determined by estimating the service requests and may change any moment during the day. In light of these facts, it makes complete sense to seek a high quality, integrated services management that reaches the best concordance between the offer of prehospital services and their real demand.

7.2.1 Standards of service

It is essential to give a brief overview of key factors influencing the management of prehospital services, which is the demand for services. This will help in understanding the importance of an accurate evaluation of the demand in terms of paramedic care needs. This work is limited to explaining the service standards used in US. An example of objectives of performance pursued by paramedics is presented in Tableau 7.1.

Tableau 7.1 Example of performance standards

Territory	Minimal Objective	Targeted Objective
Urban	80% of urgent calls in less than 8 min	90% of urgent calls in less than 8 min
Suburban	80% of urgent calls in less than 15 min	90% of urgent calls in less than 15 min
Rural	80% of urgent calls in less than 30 min	90% of urgent calls in less than 30 min

US establishes a code of rules and priorities for the allocation of calls. The priority level of a call depends on the severity of the condition of those to be rescued. At each priority level, there is a corresponding maximum delay of arrival, available staff and transport standards. Figure 7.1 shows the relationship between the number of vehicles available in the area and the average response time (Guertin, 2012).

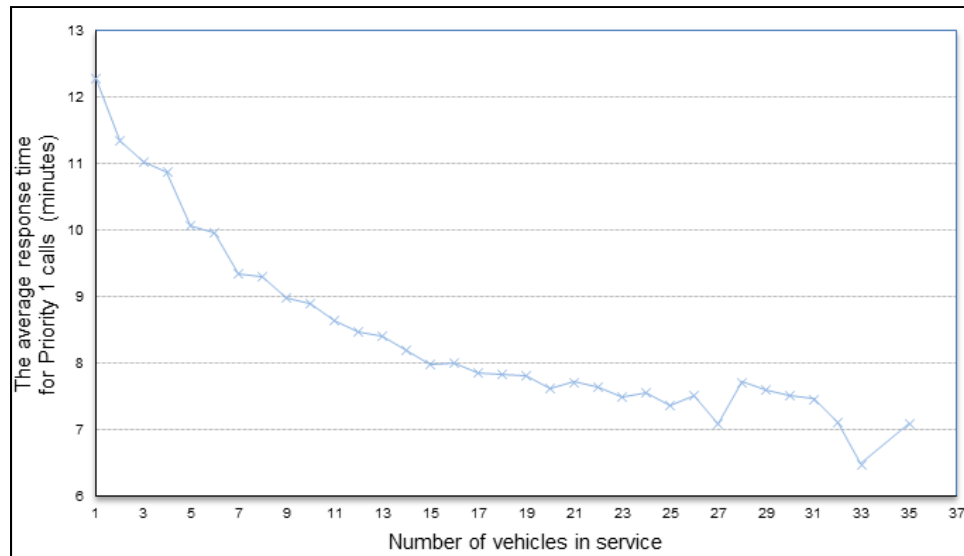


Figure 7.1 The relationship between the response time and the number of vehicles in service for Priority 1 calls (2011)

According to Figure 7.1, we can see that the average response time decreases exponentially with the increasing of the available number of vehicles. This is a significant constraint that directly influences the estimation of the demand.

7.2.2 Logistic

To cover a large territory, vehicles have only three deposits. Managing the fleet of vehicles and the capacity of the host operating centers remain the major logistic constraints. For instance, we would like to cite:

- The maximum number of vehicles (ambulances) that may be operating at the same time.
- The capacity of physical locations: it is necessary to limit the number of simultaneous departures of the same operational center to approximately 8 vehicles.
- The delay maintenance of a vehicle between two quarter services.
- The maximum number of vehicles able to start their shift at the same time: this number is limited to avoid the problems of traffic in operational centers caused by the carrying capacity of the operational centers.

7.2.3 Paramedics

Over 850 ambulance technicians or paramedics are employed by US. Some of them work full time (FT), others work part-time (PT). Some have regular jobs with strict working conditions, others do not. The paramedics are not all of the same skill level. Work rules are governed by a relatively strict and complex collective agreement but also by several work habits deeply rooted in the culture of the company and therefore difficult to change (Guertin et al. 2012).

7.2.4 Other constraints

In addition to the rules related to service requests, paramedics and logistical constraints, the emergency services are influenced by a multitude of factors, such as:

- Road traffic,
- Climatic conditions,
- Festivities,
- Etc.

In conclusion, this introduction helps the reader to become acquainted with the environment and issues related to prehospital services management. This complex problem involves estimating the demand of service, the management of ambulance men and vehicle fleets, and taking into account several constraints related to work context.

7.3 Resolution approach

The structure of the proposed PES planning model should take into consideration the following criteria:

- Better coverage of global and seasonal demand,
- Respect of the response time,
- Management of the vehicle fleet,
- Inclusion of FT paramedics,

- Inclusion of PT paramedics,
- Inclusion of meal breaks,
- Inclusion of financial, organizational and management constraints,
- Inclusion of clauses of the collective agreement,
- Analysis of the PES planning, which involves evaluating the performance of the following:
 - Number of ambulances,
 - Number of work-hours available,
 - Coverage of the demand,
 - Impact on the vehicle fleet,
 - Seasonal variation in the demand(s) and its influence on the offer,
 - Direct and indirect costs of ambulances.

Setting up the scheduling model takes into account ridership, which is encountered in 90% of cases. This provides scheduling ability to cover demand in the busiest times. It is necessary to clarify that the service demand is defined in terms of allocations from the population and institutions and not from budget constraints.

However, these are not all the periods that require the application of the full time model. Because the volume of activities varies with the seasons and, more specifically, with financial periods, we are able to reduce the percentage of the scheduling model that will be deployed to meet their respective service demands. There are also several other factors that can influence the proportion of scheduling models to operationalize in a given period (e.g., the number of absence and vacation hours, the allocation process of yearly activity volume, the proportion of scheduling models to be applied to a given period).

Therefore, this model is a continuous process that covers short and long term planning. Of course, replacement needs vary from year to year, and it is difficult to predict exactly what will be the periodic needs. We then perform a number of quarters planning to replace a time slot and day of the week based on the results of the sub-process model. The adjustment of the workforce according to the objectives of this model is carried out by not replacing some of

the absent employees. Therefore, to meet the activity volume and budget constraints of a financial period, we adjust the replacement rate of absences. Thus, in the busiest times, we try to replace all absences. While in periods of calm, we will replace less. Subsequently, we conduct periodic and weekly adjustments depending on various factors (including weather conditions, special events, holidays and operational requirements). These changes, according to the service needs, are carried through the process of defining replacement needs.

Given the complexity of these processes (examples of process in APPENDIX II), the territorial coverage of this model is 12 vehicles on average. The system response time for 82.66% of Priority 1 calls is less than 9 minutes. It is possible to maintain the national average coverage to 12 vehicles. By improving the response time, we can distribute vehicles more efficiently during different periods of the day. We may then identify a response time of 85% of interventions at or below 8 minutes 59 seconds.

Other targets could be set depending on the occupancy rate or transport time, etc. However, these measures depend on many factors, such as a delay to take charge in hospitals. In comparison, the response time depends only on the availability of vehicles and road conditions. On average, road conditions do not fluctuate greatly from year to year and vehicle availability depends directly on the schedules.

Our approach is based on the paradigm of reactivity, where the decision-making cycle is incremental and iterative. The time of an elementary cycle is the sum of the time required to detect the change and understand the situation, to decide what action to take and, finally, to implement the agreed actions (Figure 7.2). The goal is not the absolute pursuit of optimality, but rather to better satisfy all the constraints in the studied environment to achieve our goals. This should lead to the improvement of the overall system performance, which will be validated by a continual confrontation of the model with reality.

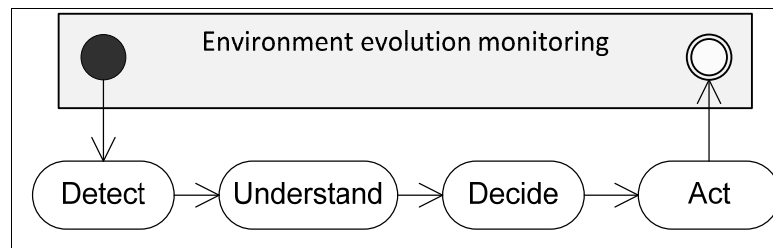


Figure 7.2 Steps for reactive decision-making in PES

Based upon analysis of the problem structure and its characteristics, a multi-agent system was selected and is defined as: a system composed of a set of autonomous and intelligent entities that coordinate their knowledge to achieve a goal or resolve a problem (Camps et al., 2011). A multi-agent system is not a simple addition of agents, but is a pooling of several intelligences and an integrated management of a set of features leading to an intelligence much greater than the sum of the pooled intelligences to achieve the following objectives:

- To better meet the demand of prehospital care.
- To optimize the management of human resources, especially in terms of paramedics scheduling planning and replacements management.
- To optimize the management of vehicles (ambulances) and operational centers.

This is mainly visible in the design, where an independent definition of each agent (planning agent, replacement agent, demand management agent, vehicles management agent, etc.) is not sufficient to define the complete system. As shown in Figure 7.3, the aspects of organization, communication, interaction and environment are even more important.

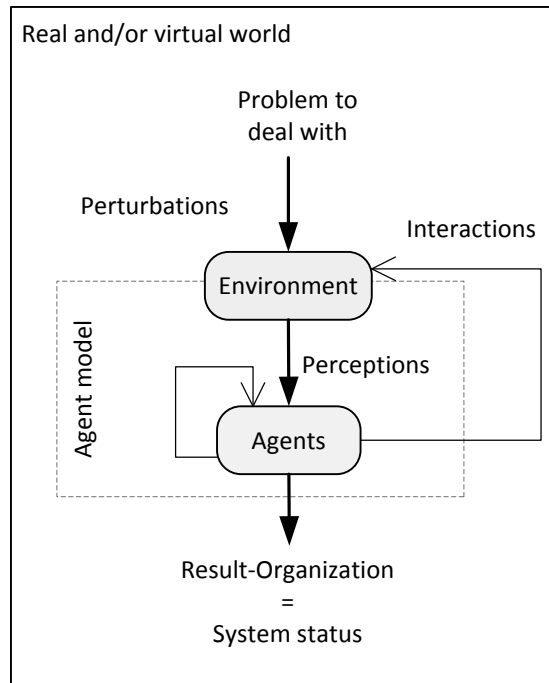


Figure 7.3 Behaviour of reactive agent in a given environment

The design of a reactive multi-agent model to resolve the problem of prehospital services management is analogous to defining a decision-making support process, whose goal is to provide a stable solution in time and space, from the problem statement, which has its own topology and dynamics. The environment is defined as the input layer of the loop of this decision making. It formalizes the topology and variations of the problem that have to be perceived by the agents it contains. The emerging organization is the output of the system, and the mechanism of decision-making is defined through the agents and their interactions. These interactions can be separated into two distinct categories. On the one hand, agent-agent interactions compose the direct branch of the decision making loop (Dessalles et al., 2007). On the other hand, agent-environment interactions characterize the feedback loop filter and thus its process of decision making. The environment is modified by both the dynamics of the problem and the dynamics of decision making related to the interactions and the actions of agents.

Figure 7.4 proposes a schematic of a multi-agent system with a four quadrants diagram based on the definitions of the agent concepts, interaction, environment, organization, institution and standard (Tranier, 2007).

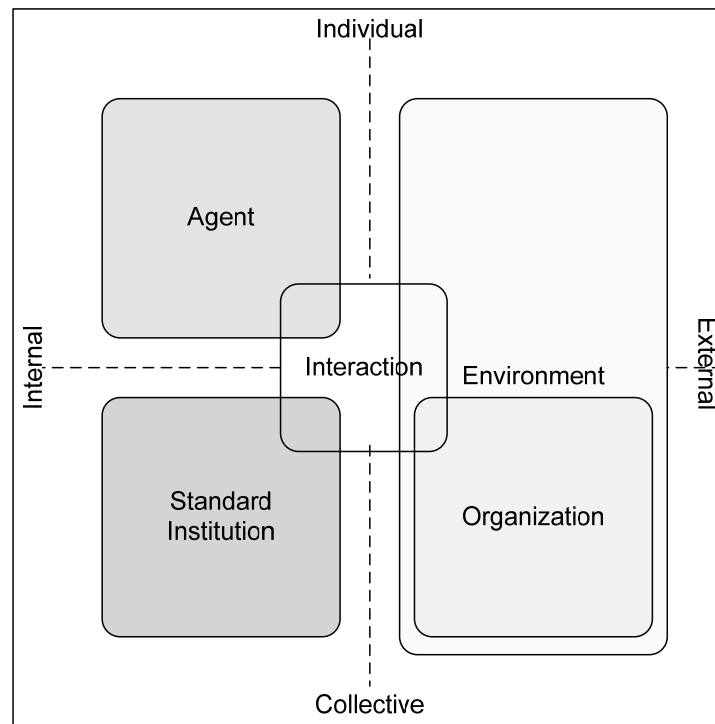


Figure 7.4 Multi-agent systems based on quadrants

An agent is a software component, a computer module or a standalone virtual entity. It is able to act in an environment. It communicates directly with other agents and makes decisions based on its perception of representations and the communications it receives. It tends to meet its objectives by taking into account the resources and expertise available to it. The BDI architecture is designed on the basis of the model "Belief-Desire-Intention". This model is based on the implementation of the beliefs, desires and intentions of a rational and cognitive agent. It uses these concepts to solve a particular problem. In essence, it provides a mechanism for separating the selection of a planned activity and its execution. This agent has a capacity to bring together a set of plans executed whenever their triggers are detected within the environment.

7.4 Methodology and application

We have chosen the method O-Mase (DeLoach and Garcia-Ojeda, 2010), which is an extension of MaseE, to model our system. This method allows for designing a multi-agent system according to an organizational vision based on meta-models. One of the biggest advantages of this method lies in its broad coverage of the development process of multi-agent systems. Indeed, it allows for following the evolution of the model from the definition of the objectives up to the design and final implementation of the application (Figure 7.5), therefore increasing and facilitating the industrialization of multi-agent systems (DeLoach and Garcia-Ojeda, 2010).

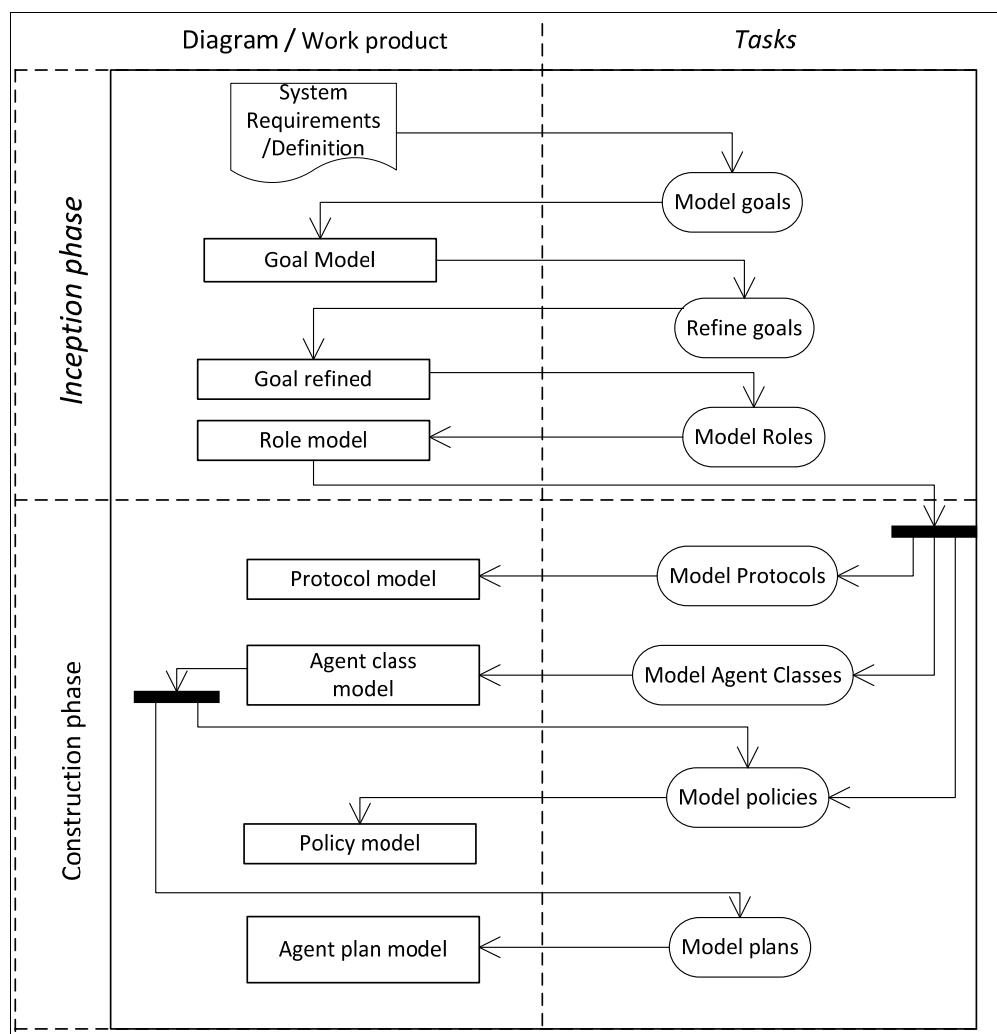


Figure 7.5 O-MASE modeling process

This method is divided into two main phases: the initiation phase and the construction phase. It considers a multi-agent system as a social organization. Each agent is a member of this organization and plays a specific role according to its capacity. It is mainly composed of models (Aim, Organization, Roles, Ontology, Agent, Agent Protocol and State). Figure 7.6 shows a portion of the defined goals.

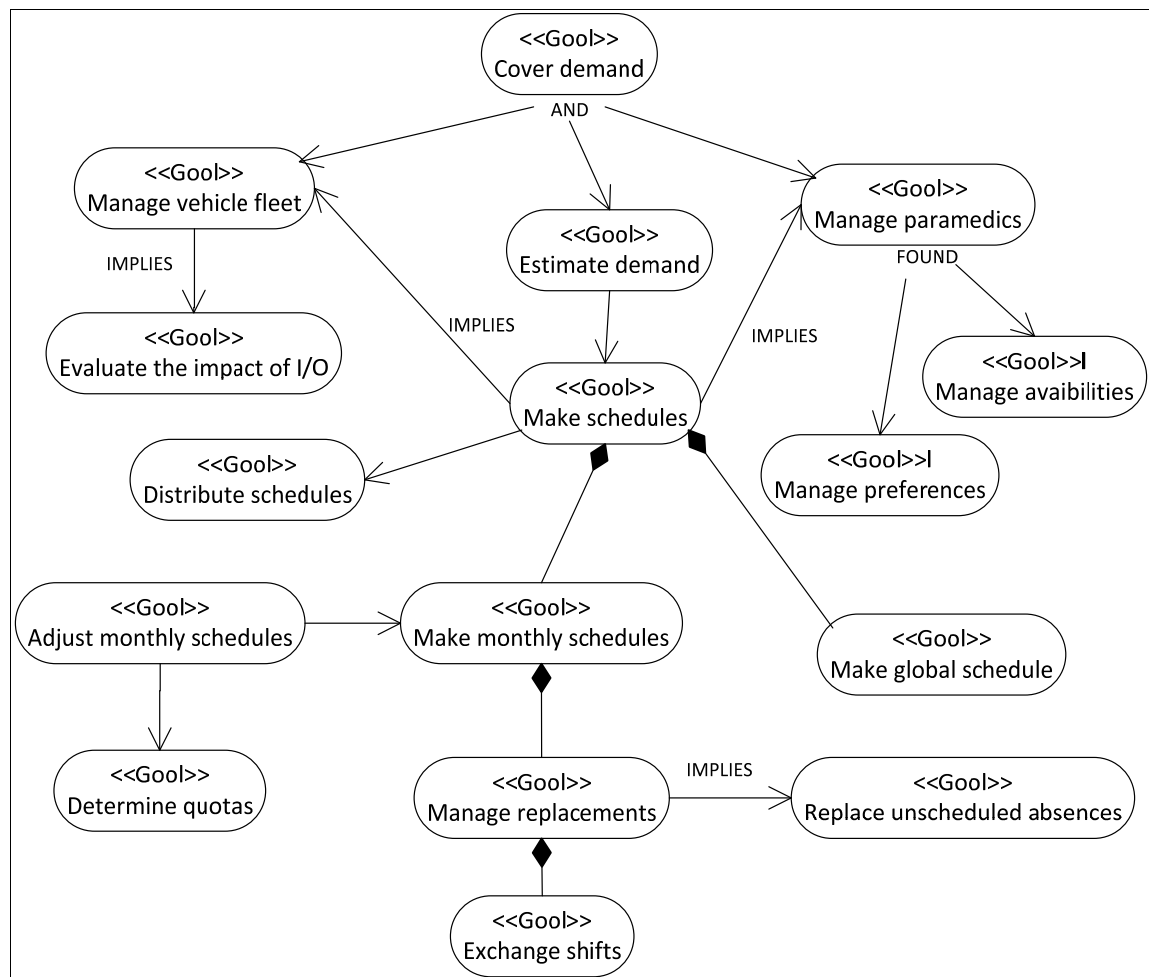


Figure 7.6 Goal model

According to our problematic, the main purpose is to cover the demand of prehospital emergency services while respecting a time-response. This objective is the overall goal, noted as "Cover demand Goal". This goal depends on the realization of a set of sub-goals that include: planning schedules according to service needs, demand planning, fleet management

and management of replacements. These goals, in turn, depend on the realization of several sub-goals. Indeed, to plan paramedics' schedules, we must first prepare the data for ambulance demand and then construct schedules models to meet the demand as soon as possible, while respecting the number of paramedics and vehicles availability, the work-hours budget allocated, paramedics preferences, etc. Consulting data requires the identification of a set of variables and processing the necessary data. The construction of the schedules model requires the definition and decomposition of the demand and research of the valid and least expensive solutions.

The goals of the diagram can be decomposed into sub-goals. In fact, "Demand estimation" can be divided into either "Annual estimation" or "Seasonal estimation". The estimation of a new demand is to define a representative model and inform the stakeholders involved in the planned changes. The search for a global solution requires the consultation of agents, satisfaction of all the constraints and choice of the best solution.

Management of events and special requests must detect disturbances, find an alternative solution and inform stakeholders. For each goal / sub-goal identified above, we must create a role for achieving it. A role in this case can achieve both goals simultaneously. To achieve a goal, a role must have one or more capacities that, when translated by execution plans in the form of state diagrams / transitions, describe the manner in which an agent should behave. For each identified objective, we associate a role. Each role will be composed of tasks designed to achieve a goal. This is achieved through state diagrams and transitions that will allow for describing the roles and relationships between them.

Afterwards, we generate a domain diagram that is used to describe the relationships between the various entities, attributes, and the overall organization. The agent diagram is used to describe the agents, allocation of roles, capabilities of each agent and services provided. The agents' model is a class diagram. The attributes of an agent are the roles that he can play, and the relationships between agents represent conversations. In this model, some agents are endowed with optimization algorithms and problem resolution. For instance, the planning agent integrates a scheduling algorithm of paramedics. The general formulation of its optimization function is thereby presented; subsequently, this function must be minimized

under certain hard constraints. An example of a hard constraint is the satisfaction of the demand. The following diagram in Figure 7.7 helps with visualizing the steps of the decision making process and identifying the triggers and the data associated with each step.

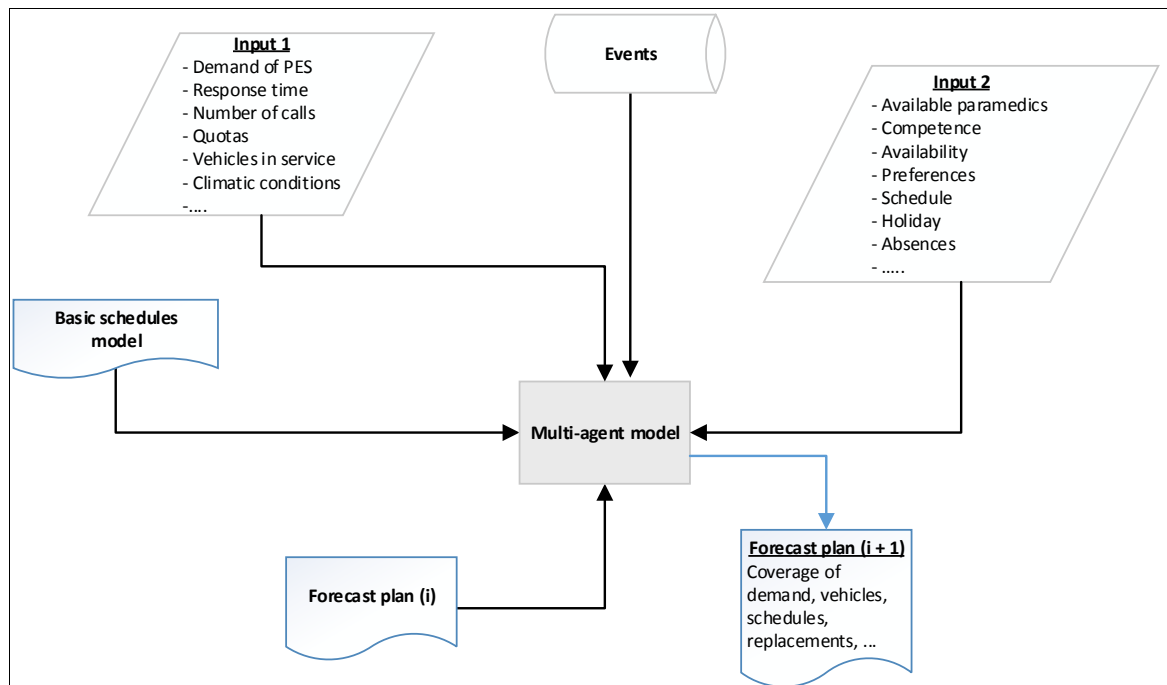


Figure 7.7 Problem solving protocol and trigger factors

This subsection presents a diagram summarizing the main steps of the PES planning. It allows for the relating of each stage, trigger factors, input and the resulting output. The starting point is the arrival of a new input (e.g., the ambulance request, the response time, the available vehicles, etc.), which is received by an "Interface" agent. Each application received will be transmitted with the necessary data to the "Supervisor" agent, which provides data aggregation by type, the variables used, etc. According to the case, each transaction will be processed by such agents as "Demand" agents, "Vehicle" agents, "Scheduling" agents, etc., who, together, look for the least expensive solution to meet all constraints.

The second function provided by our model is the management of new processing parameters, which can take place over time. A new parameter can be a new demand type that is triggered by the arrival of a new application. This request will be received by the

"Interface" agent. Then, it will be sent to the "Supervisor" agent. The latter calls for "Scheduling" agents. Each "Scheduling" agent that can satisfy this demand calculates the additional cost and sends its offer to the "Supervisor" agent. The "Supervisor" agent addresses the choice of the best offer and transmits the response to the "Interface" agent, which has to inform stakeholders concerned by this proposed solution. Another parameter that may occur is the appearance of a special event. Treating a special event begins with its detection by the "Interface" agent. He must inform the "Supervisor" agent, which provides adjustment planning, and sends the new planning to the "Interface" agent, which must inform stakeholders concerned about this event. Indeed, our model is translated into an intuitive web-application; its architecture, inspired from (Barth et al., 2011), is illustrated in Figure 7.8.

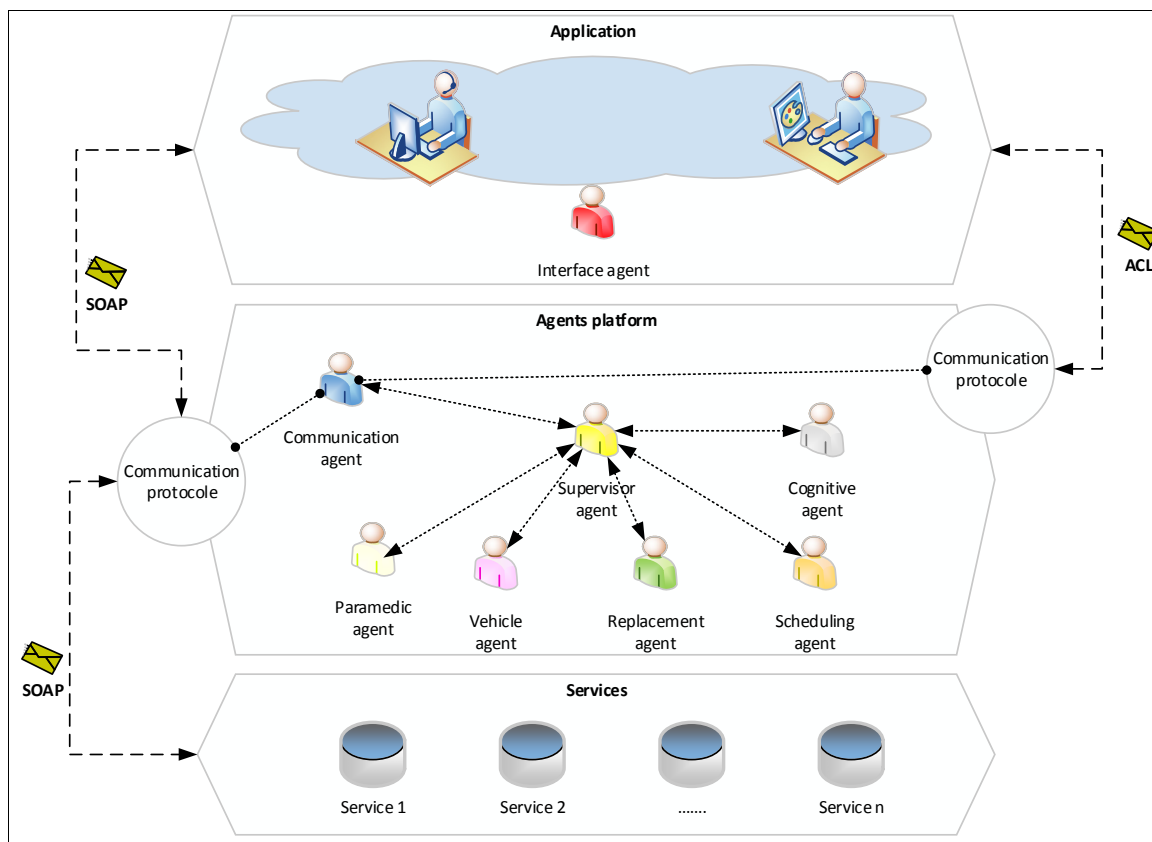


Figure 7.8 Basic application architecture

In this architecture, an agent class represents a set of agents with the necessary capacity to play a role. Each class represents a model for a type of agent that can be instantiated many times as required by the system. Figure 7.9 shows an example of a “Scheduling” agent.

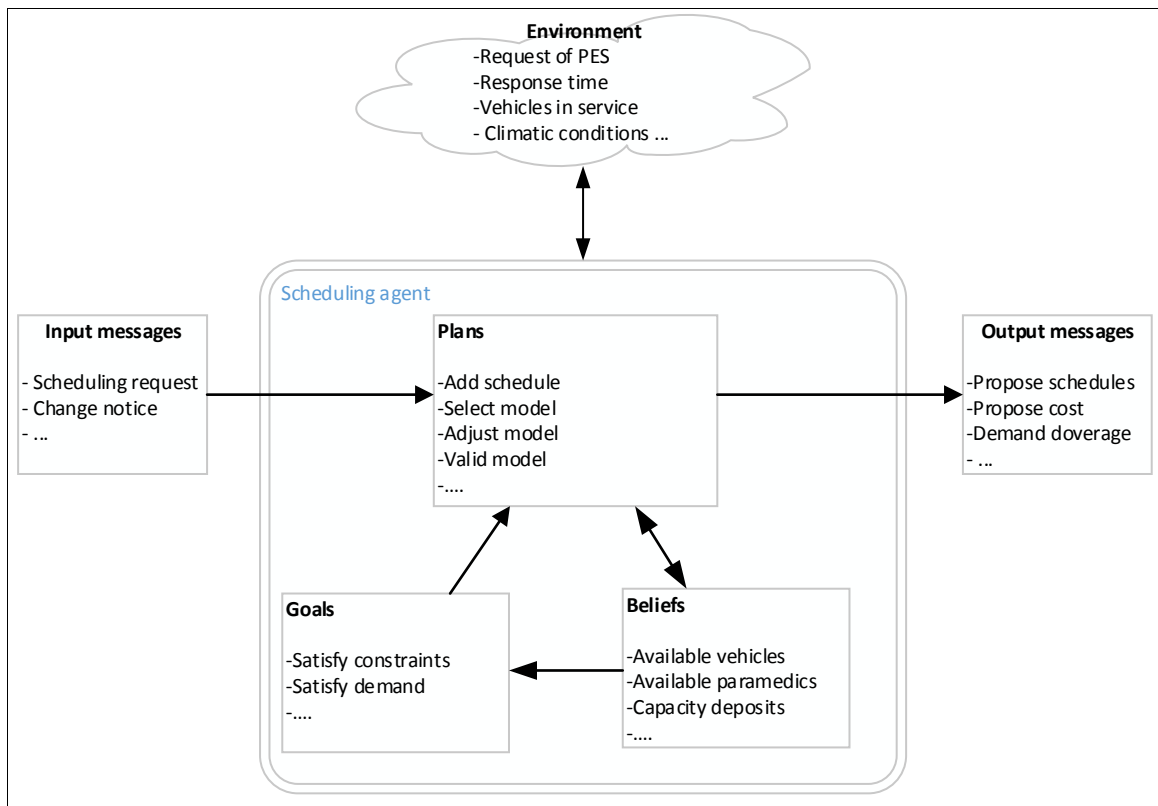


Figure 7.9 Architecture of scheduling agent

The philosophy of the O-Mase methodology provides great design flexibility. In addition, separating the role of the agent itself reduces the number of features implemented in the system. Indeed, there are a minimum number of agents that ensure the proper functioning of the system and change roles depending on the situation. Thus, this approach provides optimal use of memory resources. Furthermore, it is more interesting to separate computing tasks into separate roles. It is thus possible to parallelize calculations on different agents. The methodology must find the best compromise between a minimum number of agents and good parallelization.

This multi-agent architecture meets the PES model requirements. Each system module, task or activity is designed as an agent that provides a service. Agents are organized into groups at a specific level of abstraction and coordinated by another, hierarchically higher-level agent. Each agent can be simply modified or replaced, and new or redundant agents can be easily incorporated. An agent provides a service that is requested by another agent or is triggered by some event. The data are available in the agent's output queue, waiting to be used, requested or executed by another agent. Agents share their data by depositing and searching for it in the PES database. Concerning the goals and requirements, we present the architecture illustrated in Figure 7.8, which organizes the agents into several groups. Agents from one group have the same architecture and perform logically similar functions:

- Interface agents: The "Interface" agents interact with the user and other agents. They receive inputs, parameters and results. The information and events received are forwarded with the necessary data to other groups of agents. These ensure consolidation of data, variables and processes, depending on the nature of applications and the type of agents, etc. Then, each group of agents processes the request according to their own protocols.
- Supervisor agents: "Supervisor" agents receive and distribute requests to all other groups. They detect conflicts between agents with their global view of the problem. They have goals in conflict and can develop proposals and strategies to address them. They play a central and critical role in the organization of the proposed model.
- Scheduling agents: "Scheduling" agents are provided with a set of mechanisms and advanced features to allow them to schedule while satisfying a set of financial constraints, organizational constraints, management constraints, etc. They receive a large amount of data from all agents, including "Demand" agents. Their main role is to find quick, acceptable and less costly solutions.
- Demand agents: This group of agents is responsible for the management, definition and evaluation of the demand for prehospital emergency services. This demand is very variable from one season to the next, from one day to another and even from one hour to another in the same day. The assessment process and

calculation of demand are very complicated. The role of these agents is to detect these variations, notify and provide the necessary data to other groups of agents.

- Vehicle agents: This group of agents control the vehicle fleet and measure the impact of a schedules model or a change in demand for the vehicle fleet according to defined standards. These agents may be approached by any other class of agents, including "Scheduling", "Replacement" and "Demand" agents.
- Cognitive agents: Increasingly, more abstract context awareness makes it possible to construct the cognitive state of the integrated system. The system design includes the cognitive state of the user. The cognitive layer will also include the attributes related to the cognitive state of the user, thus constructing not only the physical but also the cognitive state of the user. However, these agents use the cognitive state to perform reasoning on a wider spectrum of information with an integrated reasoning strategy.
- Replacement agents: "Replacement" agents address solving the problem of paramedics' lack due to illness, holidays, etc. They must detect replacement needs, evaluate the relevance of these needs (availability of paramedics and vehicles, allocated budgets, etc.), set quotas, and find acceptable and less costly solutions.
- Communication agents: This last group contains communication agents dedicated to agent interaction. For example, agents that alert other agents with reply demands, agents that graphically display the state of the system, etc. An example of the function of communication agents is to notify an agent when a new demand or special event is reported. Communication agents are developed to inform all agents about their environment changes, interact with agents, explain the current state of a particular agent group, etc. Currently, our prototype implementation runs entirely on a PC.

This application includes a Human-machine interface (HMI) that facilitates the user's intervention in the resolution process and visualizing the results. The system was tested in the US Corporation and generally allowed to obtain satisfying solutions with acceptable computation.

7.5 Results

In this section, the results obtained by our model are presented (analysis of results in APPENDIX V). Concerning the demand covered, it is quite simple to evaluate the quality of the results. However, with regard to other elements such as planning quality, evaluation is less simple to do. We have created a list of measures that allow the user to assess the quality of the overall solution. These measures are:

- Coverage of the demand,
- Number of hours-vehicles,
- Number of hours-men,
- Number of schedule,
- Number of vehicles,
- Number of additional vehicles,
- Execution time.

We considered that these statistics are those necessary and / or useful for assessing the quality of a solution with respect to both the demand and the vehicles fleet, etc., but especially for its implementation potential in the US Corporation. The three tests in this section are based on several parameters (for instance):

- Three scenarios that include real data of the demand of prehospital services for the year 2012 and special events,
- 596 paramedics,
- A maximum number of 123 vehicles,
- A banking schedule generated by the system,
- Stopping criterions used in accordance with the iterations number without improving the best known solution.

Tableau 7.2 shows the resolution time of each test. By changing the scenario of the problem we aim to resolve, we can see that the execution time differs from one test to another.

Tableau 7.2 Execution time of each test

	Test 1	Test2	Test 3
Time	00:23:12.84	00:25:31.23	00:41:27.18

Figure 7.10 shows the results based on the assessment of the Sunday demand for the test solution 1. Figure 7.10 shows that the solutions generated by our model have a good coverage of demand compared to the offer of each of the tests. We also arrive at the same conclusion for the Wednesday of each test scenario. Figure 7.11 shows the comparison between the offer and demand results obtained in Test 1 (more results in APPENDIX III).

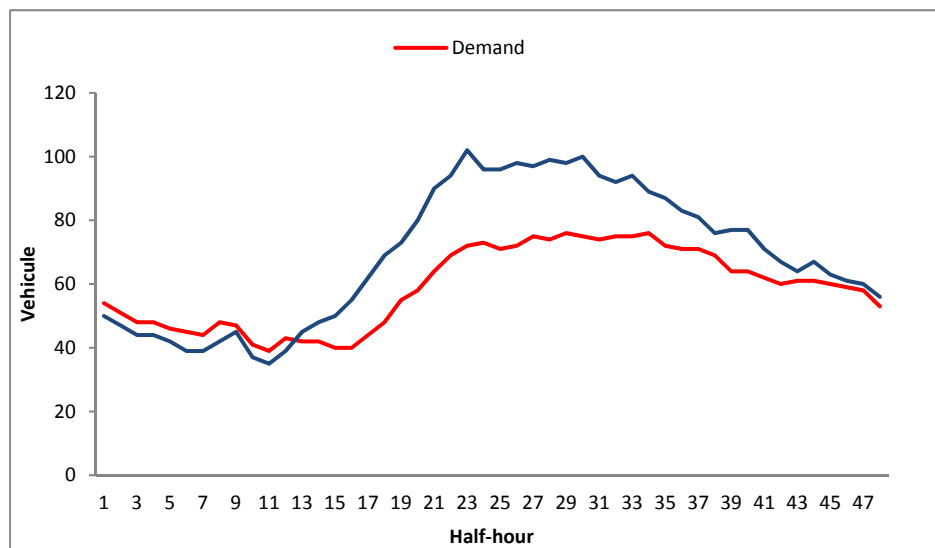


Figure 7.10 Comparison between offer and demand for test 1 (Sunday)

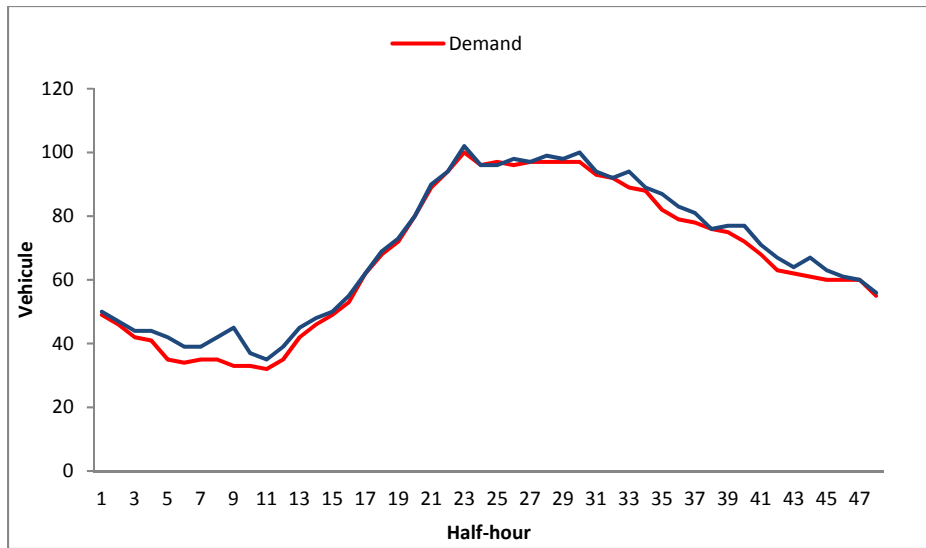


Figure 7.11 Comparison between offer and demand for test 1 (Wednesday)

Despite the change in demand, this model gives good results for the coverage of demand in all three tests, which will greatly improve the time-response of paramedics. Tableau 7.3 shows the distribution of results for the three tests based on the type of schedule. These results are presented in detail in our system as a description report of hours per solution. The summary of the other results is presented in

Tableau 7.4. The main strength of this model is the rapidity of resolution. In the short term, we see it as an excellent simulation tool of scenarios, modifications and improvements to existing structures and management processes at US.

Tableau 7.3 Distribution of schedule by type for the 3 tests

Type	Test 1	Test 2	Test 3
614 / 10h	40	40	40
714 / 12h	410	404	412
814 / 10h	26	20	20
1014 / 8h	120	132	124
Total	596	596	596

Tableau 7.4 Summary of the other results

Item	Test 1	Test 2	Test 3
Hours-vehicles	568.491	568.907	568.881,5
Man-Hours	1.136.982	1.137.814	1.137.763
Quantity of schedules	596	596	596

7.6 Conclusion

The objective of our work was to design and produce a reactive multi-agent decision-making support model in a simple way and according to an integrated approach. Prehospital emergency services have proven to be an interesting scope to implement these ideas because they involve the modeling of a complex system. The proposed model was able to answer the majority of both organizational and operational management constraints of prehospital services for US. We believe that this objective has been achieved and our model quickly provides satisfactory solutions on desktop machines, and its flexibility allows for testing and evaluating a large number of scenarios. The solutions offered are of good quality and take into consideration the constraints of management (i.e., demand, vehicles and paramedics).

CONCLUSION GÉNÉRALE

La planification et la gestion des services préhospitaliers est un problème très complexe. Ce travail de recherche est basé sur une contextualisation des besoins spécifiques aux services préhospitaliers d'urgence pour évoquer les avantages de la modélisation à base de systèmes multi-agents et des méthodes d'optimisation. Pour cela, nous avons appliqué notre approche IGAP. En général, notre démarche de modélisation vise à représenter la réalité observée et à construire un modèle artificiel. Elle intègre tous les flux, les échanges, les interactions associés à la réalité représentée. Ces flux traduisent eux-mêmes la collaboration des différents agents ou acteurs pour trouver des solutions, aboutir à des décisions et réaliser une planification associée à leur collaboration ou à leur propre intervention (par exemple : trouver des solutions des problèmes de gestion des remplacements qui lui sont posés). Ce travail de recherche propose un modèle réactif pour l'expérimentation des scénarios afin de trouver des solutions décisionnelles, organisationnelles et d'optimisation. Ce modèle implique tous les agents individuellement et collectivement dans leurs interactions, de manière instantanée, réactive et prospective au travers de leurs interventions.

Les capacités des SMA et des méthodes d'optimisation offrent une approche dynamique de la réalité. Pour les services préhospitaliers d'urgence, la modélisation multi-agents favorise une gestion optimisée des ressources disponibles liée à une représentation dynamique et évolutive de son fonctionnement structuré et à une accélération des analyses d'informations à certaines étapes. Cette optimisation se fait en fonction du contexte des besoins et du niveau de performance choisi. L'optimisation et la modélisation basée sur les SMA peuvent faciliter la recherche et l'évaluation entre différentes solutions de planification, et ainsi orienter de façon pertinente les choix organisationnels. Elles peuvent modifier la quantité, le temps réponse ou encore l'affectation des différentes ressources. Elles peuvent devenir une aide précieuse pour le pilotage des activités et de l'organisation des services préhospitaliers d'urgence.

En plus, sur la base des modèles proposés qui prennent en compte la majorité des contraintes de planification des SPU, une procédure de qualification économique pourrait être introduite. Cette procédure peut être générée par processus ou type de processus, par partie de processus

ou par type d'intervention ou d'activité mise en place. L'objectif de cette qualification économique est d'associer à chaque intervention ou transport ambulancier non seulement un coût de production, mais aussi un revenu. Dès lors, la comparaison au moins différée du coût de production avec le revenu peut être rendue possible.

La modélisation multi-agents et les méthodes d'optimisation offrent une piste d'exploration intéressante pour une gestion optimisée des services préhospitaliers d'urgence. Elle associe connaissance, optimisation et simulation de la réalité. Par la connaissance qu'elles fournissent sur l'organisation, sur l'activité réelle de chaque intervenant et les coûts associés, elles fournissent un outil d'évaluation pour l'adoption de bonnes pratiques et pour la recherche d'efficience. Le but est d'aboutir à un temps de réponse optimisé, par les informations obtenues sur les appels en transport ambulancier, la disponibilité des techniciens ambulanciers et des véhicules, *etc.*, elles peuvent contribuer aux efforts fournis pour minimiser du temps et des coûts. Dans cette logique, elle peut contribuer à une recherche de maximisation de la performance.

L'acceptation que la principale marge d'optimisation pour les services préhospitaliers d'urgence se trouve dans la bonne utilisation et non forcément la réduction des moyens de production, permet à la modélisation multi-agents et les méthodes d'optimisation d'apparaître comme un outil d'efficience, notamment dans son aide à la planification des ressources disponibles. C'est dans cette optique que notre modèle a été utilisée dans une expérimentation avec des données de la Corporation des services préhospitaliers d'urgence de Québec. Cette démarche a permis de situer une partie des apports de ce modèle par rapport aux besoins des SPU. L'utilisation d'IGAP, d'O-MASE et du *Set Covering* a surtout permis de minimiser le temps de réponse des techniciens ambulanciers. Nous avons estimé que cette minimisation a une influence sur la qualité de la planification, mais qu'elle pouvait être source de gain de productivité. Ce gain de productivité peut s'accompagner d'une minimisation du coût de production des soins et peut impacter la rentabilité de ces services.

Dans le premier article (Chapitre 2) nous avons présenté notre approche globale et intégrée appelée IGAP (*Integrated and Global Approach*) pour la gestion et la planification des SPU. Cette approche constitue notre méthodologie utilisée pour la conception de notre modèle

d'optimisation et de notre architecture multi-agents. Elle intègre tous les processus des SPU (ou au moins les processus les plus importants) et ce dans une démarche de négociation et de validation interprocessus. Elle est basée sur les principes de communication entre les différents acteurs et d'interaction entre les processus permettant ainsi d'avoir une forte réaction du modèle proposé.

Dans le deuxième article (Chapitre 3) nous avons présenté la problématique de la planification des services préhospitaliers d'urgence et nous avons proposé pour sa résolution un nouveau modèle réactif. Ce modèle permet de produire des horaires de qualité selon les standards d'Urgences-santé, de respecter les contraintes de gestion et de bien couvrir la demande de service tout en minimisant les carences entre l'offre et la demande sur tout l'horizon de solution. Le processus d'optimisation est composé de deux parties principales et la méthode de résolution est fondée, d'une part sur la programmation linéaire adaptée, et d'autre part sur la programmation par contraintes et une combinaison d'autres algorithmes. Notre objectif était de produire un système utilisable sur des ordinateurs de bureau tout en étant fréquemment utilisées pour évaluer un large éventail de scénarios. Ce modèle a été testé et validé par un ensemble de scénarios de tests dans un contexte réel et les résultats obtenus (présentés dans le Chapitre 3 et l'Annexe IV) sont prometteurs en termes de couverture de demande, de satisfaction de contraintes et du temps de résolution.

Dans notre troisième article (Chapitre 4) qui porte sur le thème de la modélisation et les systèmes complexes d'aide à la décision, nous étions intéressés plus précisément par les systèmes multi-agents. La réalisation de ce travail en collaboration avec l'une des plus importantes corporations des SPU en Amérique du Nord nous a permis de concevoir et de proposer une architecture à base d'agents réactifs dont nous avons intégrés des fonctionnalités d'optimisation et des algorithmes mathématiques avancées. Les agents détectent les problèmes de planification, coordonnent et communiquent entre eux afin de proposer des solutions de confection des horaires, de répartition par secteurs, *etc.* Les résultats obtenus sont présentés dans le Chapitre 4 et l'Annexe V.

Le cadre théorique et pratique présenté dans cette recherche concernant la modélisation mathématique et en SMA du problème de gestion et de planification des SPU pourrait être vu

et étudié de plusieurs dimensions. En effet, la précision des données est primordiale pour un développement efficace des approches de solution afin d'atteindre les objectifs souhaités. En outre, nous proposons trois perspectives principales à ce travail de recherche :

- Compléter notre modèle et notre architecture par l'intégration d'autres processus de planification des SPU, chose qui permet d'améliorer la performance globale du système. Les principaux processus à ajouter seront liés directement à la gestion de la flotte de véhicule, au problème de routage des ambulances et de répartition des appels de transports ambulanciers.
- L'intégration des processus de gestion et de planification des SPU en relation avec les autres entités de la chaîne préhospitalière (Hôpitaux, salles d'urgence, *etc.*). Dans ce contexte, plusieurs perspectives pourraient être envisagées pour continuer ce travail de recherche. Une validation expérimentale devra être effectuée en partenariat avec ces entités.
- L'intégration et l'utilisation des métaheuristiques pour la résolution du problème de planification des SPU et du problème d'affectation des ambulances. Il s'agit d'un axe de recherche très intéressant permettant de comparer l'efficacité de résolution de plusieurs modèles mathématiques basés sur des méthodes d'optimisation différentes (modèle mathématique actuel basé sur la programmation linéaire versus un modèle basé sur une métaheuristique) dans le même environnement et pour la même problématique.

En conclusion, ce travail de recherche a démontré l'importance de l'utilisation des SMA et des méthodes d'optimisation. Il constitue une première réflexion sur une approche globale et intégrée pour la planification des services préhospitaliers d'urgence. Le modèle et l'architecture proposés présentent un grand potentiel dans la gestion, l'aide à la décision, la planification et l'optimisation des SPU. Ils intègrent des processus clés du domaine des SPU permettant de mieux satisfaire un ensemble de contraintes organisationnelles et de réduire les coûts de production.

ANNEXE I

DEMANDE ESTIMÉE POUR CHAQUE JOUR DE LA SEMAINE (HIVERNALE ET MINIMALE ANNUELLE)

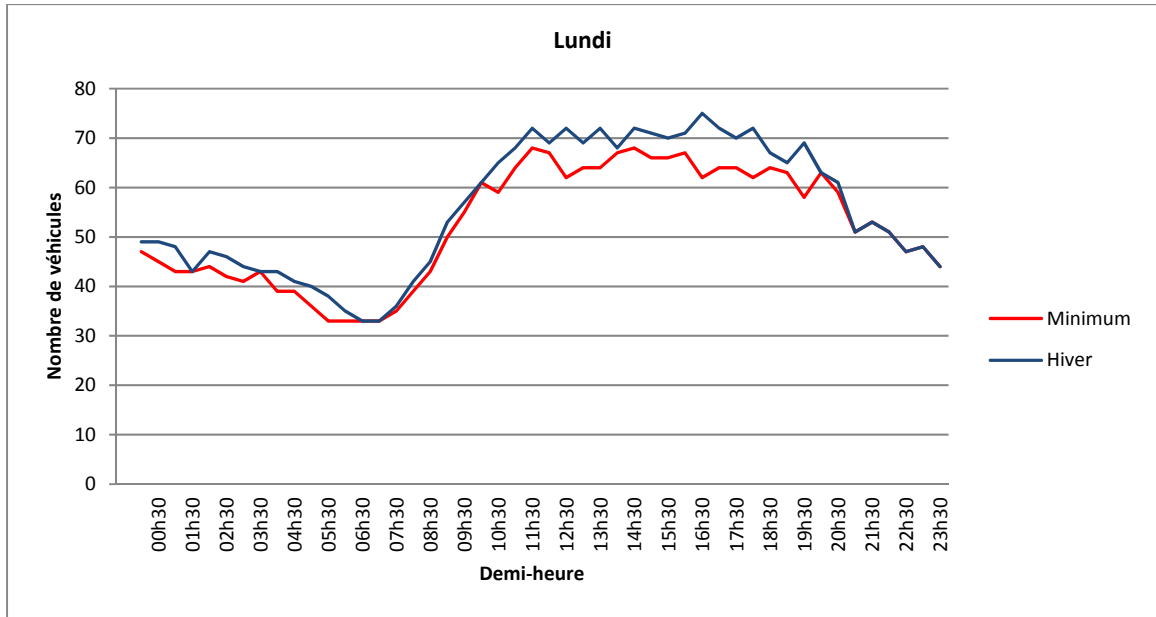


Figure-A I.1 Demande estimée pour Lundi

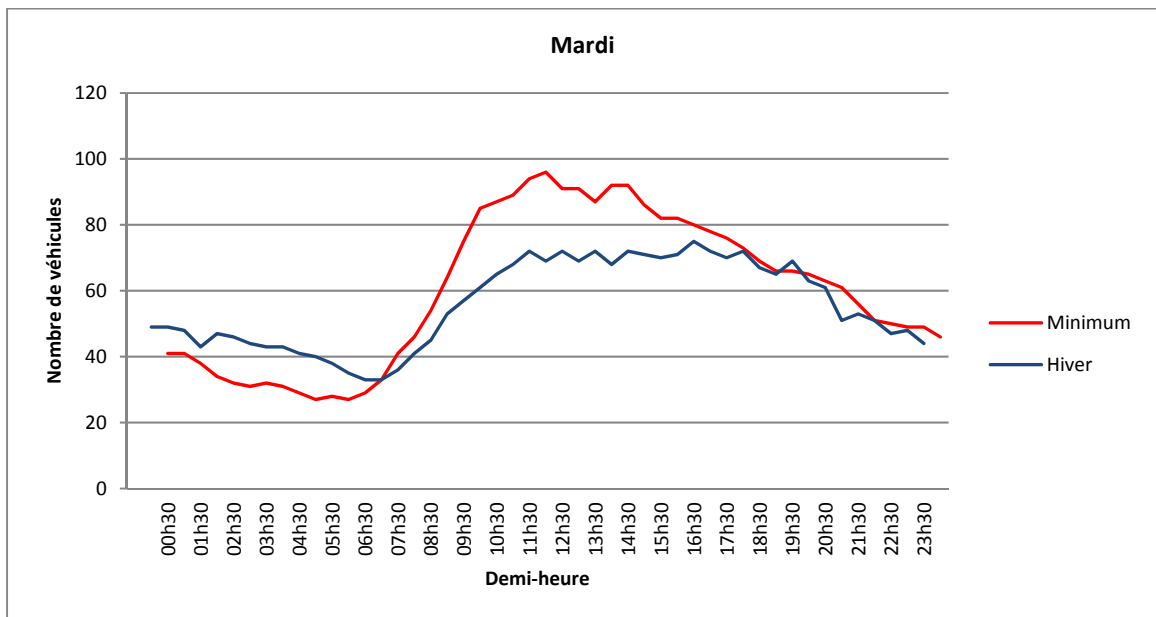


Figure-A I.2 Demande estimée pour Mardi

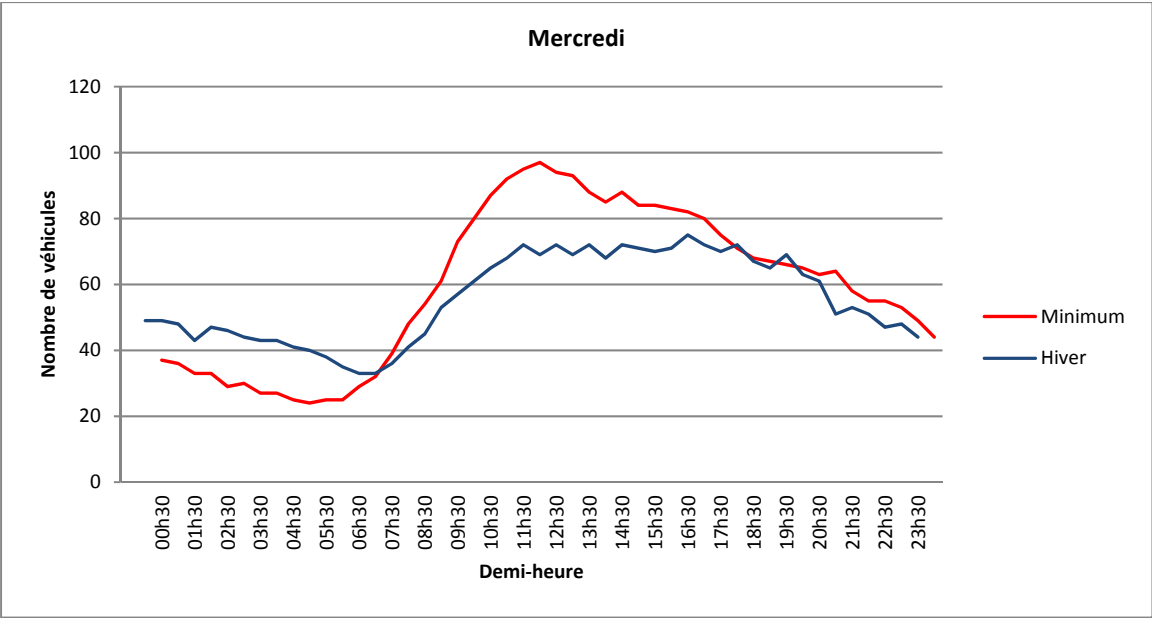


Figure-A I.3 Demande estimée pour Mercredi

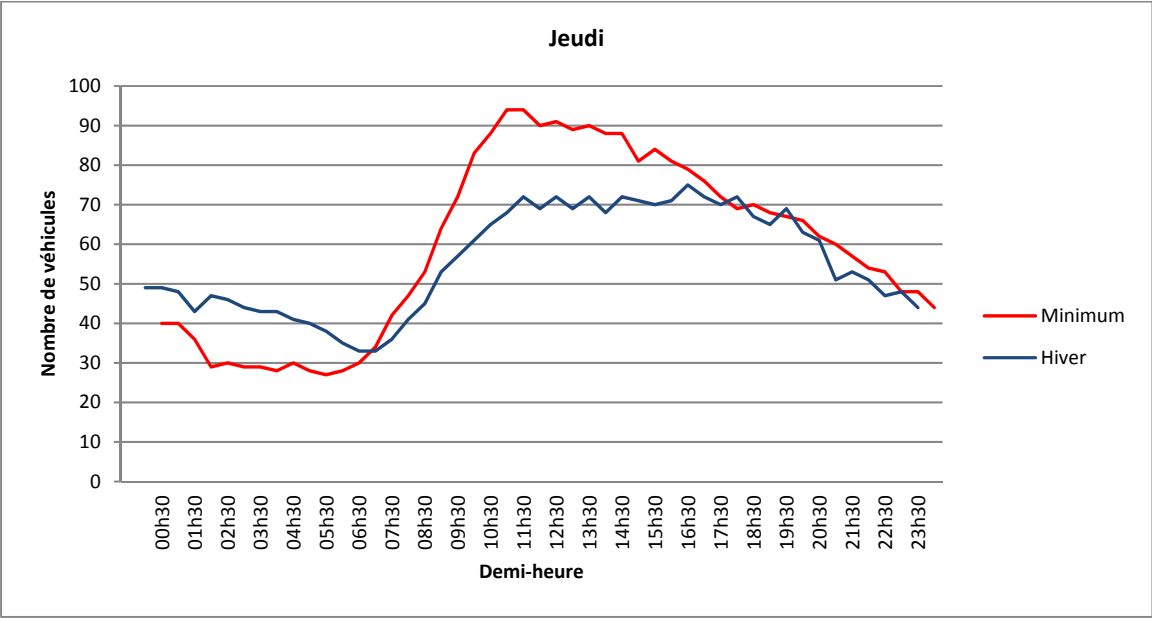


Figure-A I.4 Demande estimée pour Jeudi

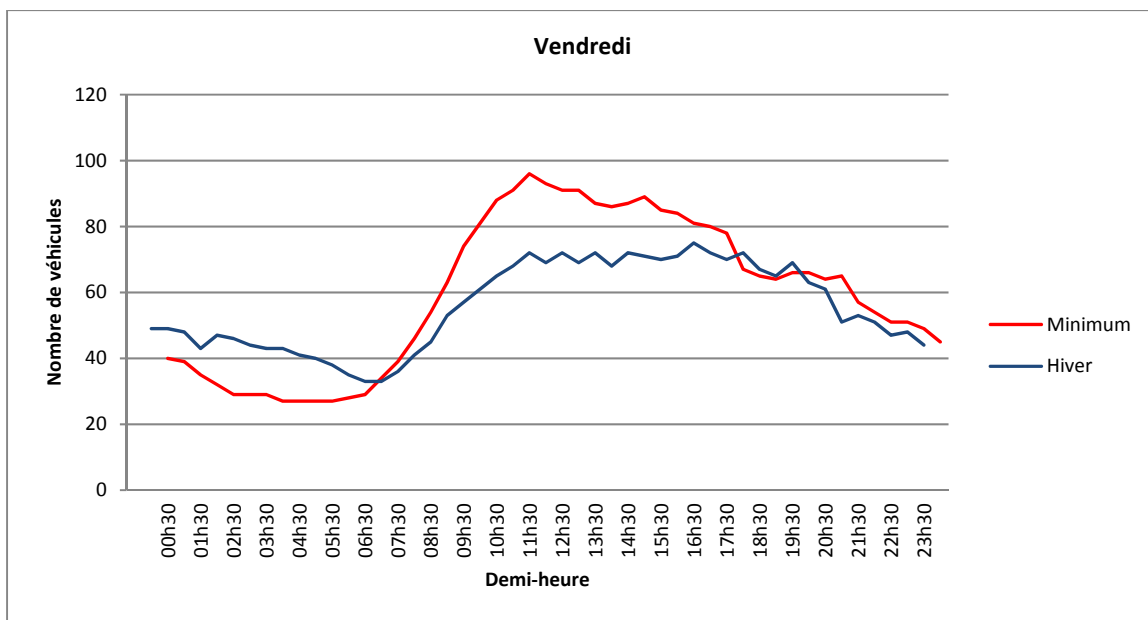


Figure-A I.5 Demande estimée pour Vendredi

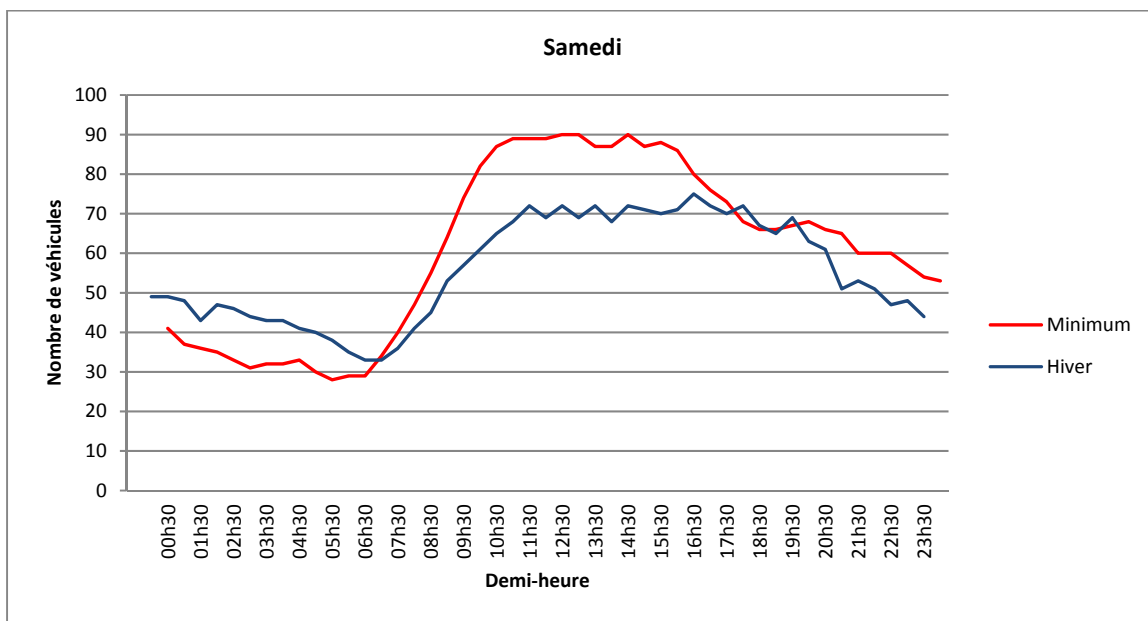


Figure-A I.6 Demande estimée pour Samedi

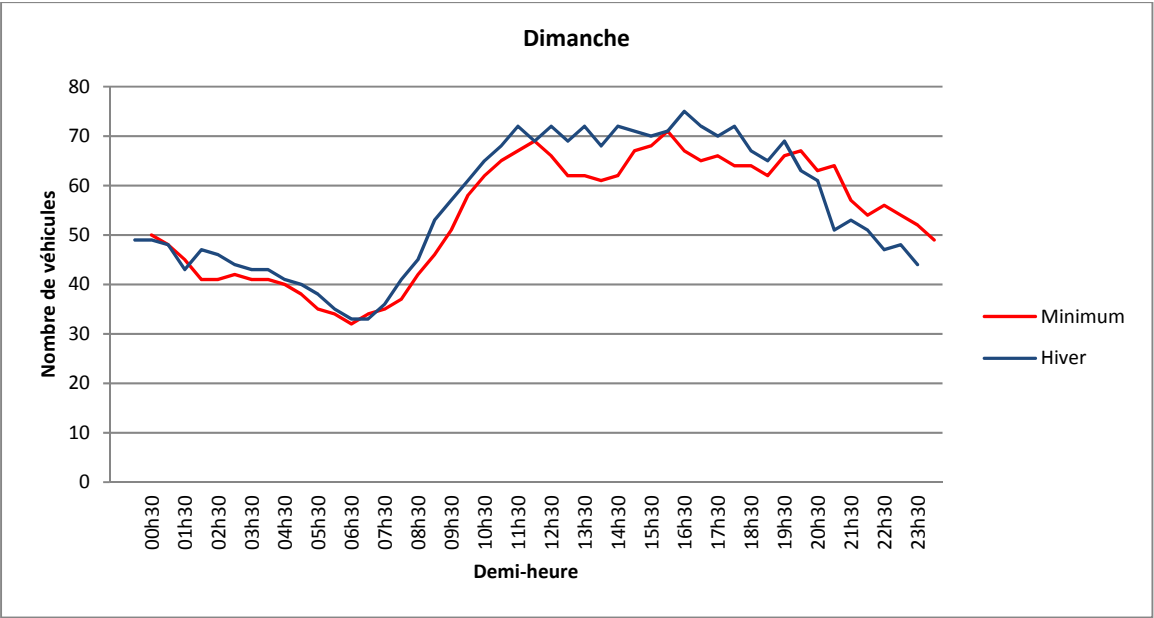


Figure-A I.7 Demande estimée pour Dimanche

ANNEXE II

EXEMPLE DE L'ANALYSE PRÉLIMINAIRE DES PROCESSUS

Cette annexe présente un exemple de l'analyse préliminaire des processus (ces processus sont tirés de l'étude d'un cas réel) suivants :

- Traitement des formulaires de disponibilités et de préférences
- Offre des remplacements temporaires
- Offre des quarts à la pièce
- Offre des quarts en temps supplémentaires
- Offre des quarts pour les événements spéciaux

Présentation générale

Les services préhospitaliers d'urgence ont pour objectif de répondre le plus rapidement possible aux appels d'urgence médicale de la population, de prodiguer les soins immédiats adéquats et de transporter, s'il y a lieu, les bénéficiaires vers le centre hospitalier le plus approprié.

Chaque mois, des horaires mensuels doivent être établis afin de répartir les horaires de base et des quarts non comblés entre les employés surtout que le taux d'absentéisme dans ce secteur est relativement élevé.

L'ensemble des horaires mensuels générés à chaque mois peut être subdivisé en deux groupes :

- Le premier groupe contient les horaires de « remplacement en bloc » confectionnés à partir des horaires de base complets n'ayant pas de détenteur ou de ceux disponibles suite à des absences à moyen ou long terme des employés à temps plein. Ce type d'horaires ne nécessite pas de morceler les horaires de base entre plusieurs individus.
- Le deuxième groupe, nommé « attribution à la pièce », représente la moitié des horaires mensuels. Il comprend les horaires individualisés constitués de quarts

appartenant à divers horaires de base regroupés de façon à respecter toutes les contraintes de confection.

Donc, il existe une certaine quantité de quarts de travail non comblés dus aux absences prévues et imprévues des employés et afin de remédier à cette situation, au début de chaque mois on confectionne un ensemble des horaires destinés aux employés de la liste de rappels. Le diagramme suivant (Figure-A II.1) montre le processus complet de confection des horaires mensuels :

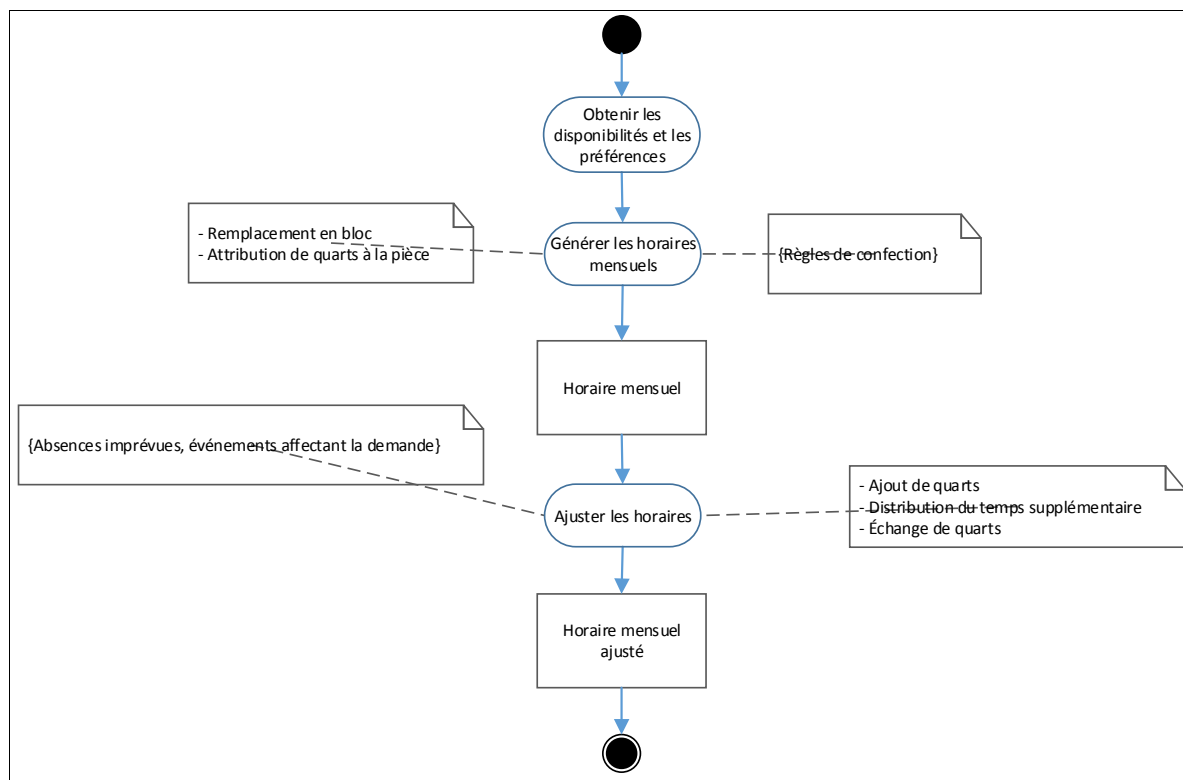


Figure-A II.1 processus complet de confection des horaires mensuels

D'une manière générale, l'attribution est basée, dans l'ordre, sur les besoins en effectifs, sur l'ancienneté des employés, sur leurs disponibilités et finalement sur leurs préférences (plage horaire, secteur, type de quart). Il s'agit d'une étape redondante et exigeante du processus de confection d'horaires.

Traiter les formulaires de disponibilités et de préférences

La première étape de la confection des horaires mensuels est l'obtention des disponibilités et des préférences de chaque employé à temps partiel. Ces informations sont obtenues via un formulaire papier standardisé. Les employés à temps partiel doivent y indiquer les jours et les plages horaires (jour, soir et nuit) où ils sont disponibles durant le mois, leurs préférences quant aux plages horaires, au secteur de travail et la durée des quarts (8h, 9h, 10h ou 12h). À leur embauche, les ambulanciers à temps partiel doivent obligatoirement fournir quatre mois de disponibilités totales (tous les jours et toutes les plages de calendrier).

Par la suite, les employés qui veulent modifier leurs disponibilités, ils doivent remplir le formulaire papier et le remettre au plus tard deux semaines avant le début du mois. Tous les changements de disponibilités ainsi reçus sont alors saisis dans une application informatique par le commis aux horaires. Il est possible d'ajouter des quarts de disponibilité durant le mois en communiquant avec le commis par téléphone, par un formulaire papier ou par courriel. Toutefois, il n'est pas permis de réduire ses disponibilités avant la période de travail suivante.

En fait, la disponibilité minimale (pour un ambulancier paramédical à temps partiel) est fixée à quatre quarts par deux semaines, dont au moins une fin de semaine aux deux semaines. Cependant, il est possible d'avoir jusqu'à 85 heures de travail sur deux semaines. Le diagramme suivant (Figure-A II.2) présente le processus d'obtention et de traitement des disponibilités et préférences des ambulanciers paramédicaux :

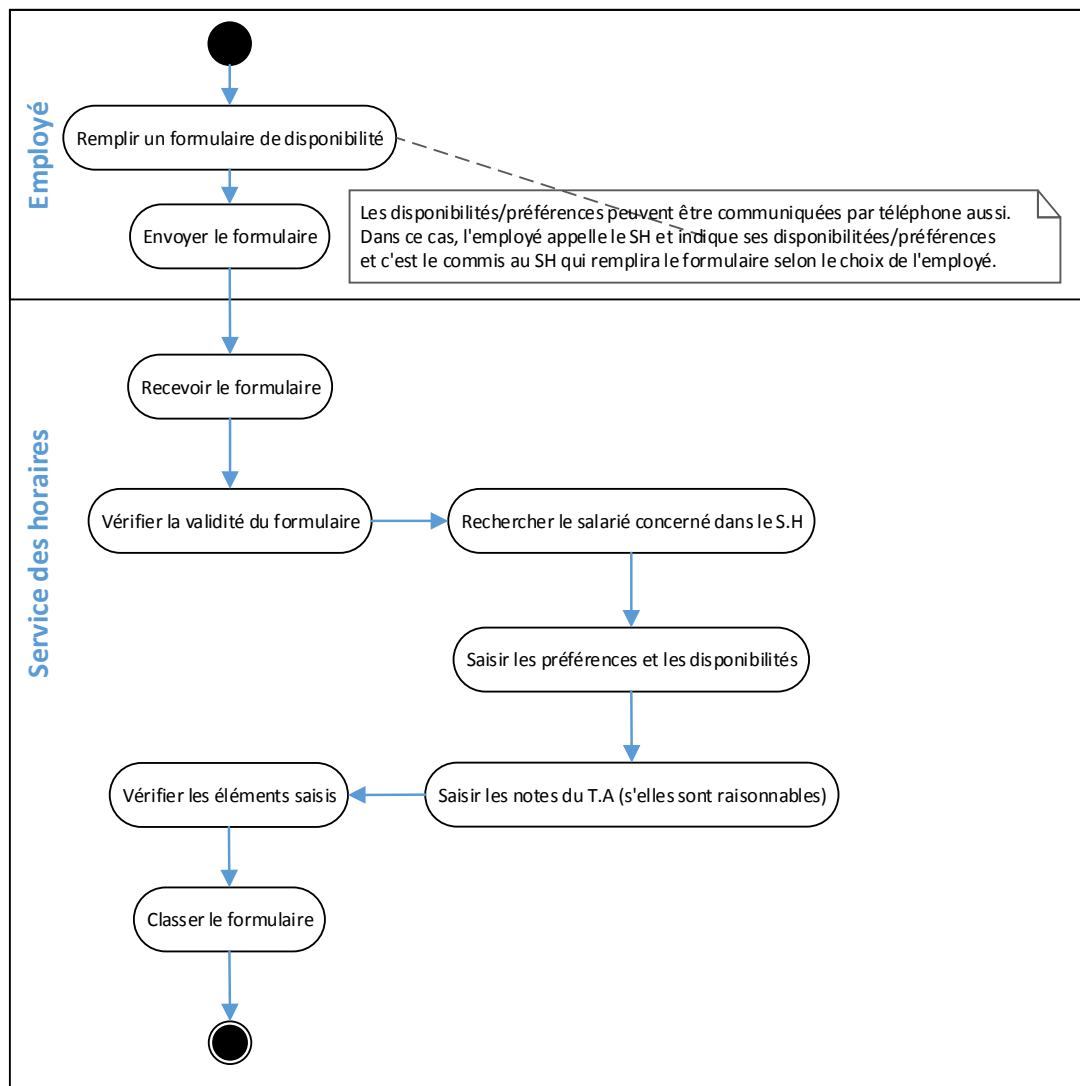


Figure-A II.2 Processus d'obtention et de traitement des disponibilités et préférences des ambulanciers paramédicaux

Les étapes à réaliser par le commis aux horaires sont les suivantes :

- Le commis aux horaires reçoit les formulaires de disponibilité, les dates et les initiales;
- Il s'assure de la conformité de la disponibilité selon la convention collective, selon la période de l'année, selon que le salarié est nouvellement embauché ou non.
- Si la disponibilité est conforme, le salarié la saisit dans une application informatique, autorise le formulaire et le laisse au commis suivant pour qu'il en fasse la vérification.

- Si la disponibilité n'est pas conforme, le commis en avise le salarié par téléphone (le plus tôt possible) en lui demandant de faire les modifications nécessaires pour rendre sa disponibilité conforme. Le commis l'avise également qu'à défaut de rendre sa disponibilité conforme avant la date limite, l'ancienne disponibilité se reconduira automatiquement.

Il procède ainsi aux vérifications suivantes :

- Le formulaire est-il remis dans les délais ? le salarié sur la liste peut modifier sa disponibilité à chaque période horaire en remettant son formulaire au service des horaires dans les délais. Un formulaire reçu hors délai ne peut être autorisé, ni informatisé.
- Le salarié a-t-il inscrit le nombre de jours désirés ? le salarié doit toujours inscrire un nombre de jours désirés. Le nombre de jours désirés doit être cohérent avec le nombre de cases cochées sur le formulaire.
- Le salarié a-t-il choisi sa fin de semaine ? le salarié a le choix. Un NON, cela veut dire qu'il est disponible une fin de semaine sur deux; (samedi et dimanche consécutifs) et qu'il n'est pas disponible la fin de semaine suivante.
- Le salarié a-t-il émis une disponibilité conforme ?
 - Le commis vérifie d'abord la disponibilité de fin de semaine. Il vérifie la première quinzaine et la deuxième quinzaine séparément (Règles de disponibilité minimale).
 - Le commis vérifie chacune des quatre semaines de disponibilité sur le formulaire (même en vacances, la disponibilité doit être conforme)
 - Le commis vérifie le nombre total de jours désirés. Une semaine de vacances équivaut à 5 journées de disponibilité, il faut en tenir compte dans le total des journées désirées.
 - Le salarié peut émettre une préférence, cela ne réduit pas ses chances d'obtenir des quarts de travail.

Offrir les remplacements temporaires (à long terme)

Dans les faits, on débute par les remplacements en bloc. Cette étape est réalisée trois semaines avant le début de la prochaine période de travail. Concernant les ambulanciers paramédicaux et afin d'effectuer les remplacements en bloc, les commis aux horaires doivent tout d'abord approuver tous les horaires de base. Les horaires sans titulaire pour une période de 30 jours pouvant faire partie du processus. Ils sont souvent d'une durée indéterminée et la priorité est accordée aux techniciens ambulanciers à temps complet.

- Techniciens à temps complet :

L'ambulancier choisira l'horaire qu'il préfère selon le processus suivant (Figure-A II.3) :

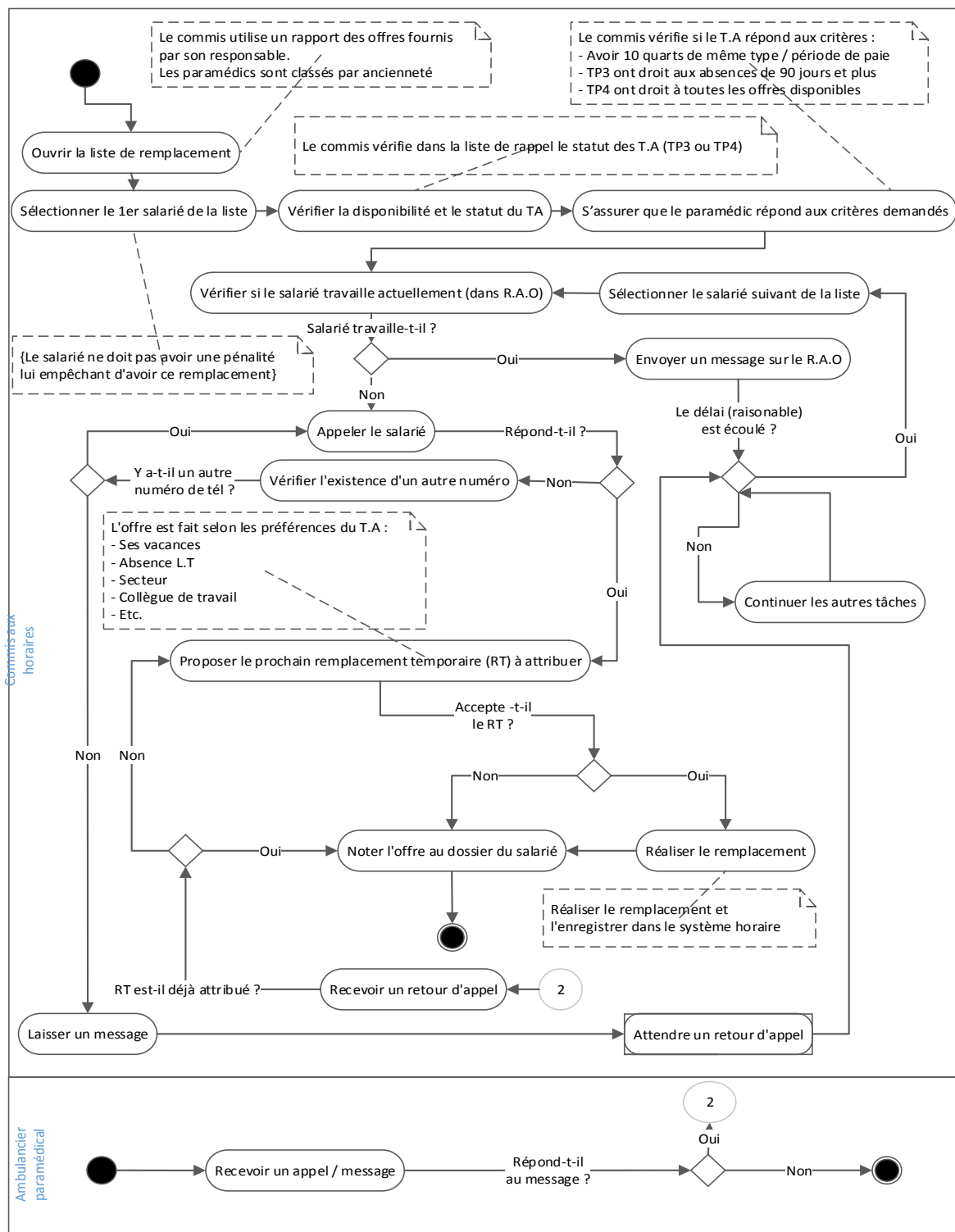


Figure-A II.3 Processus de gestion des remplacements temporaires (à long terme) des ambulanciers paramédicaux à temps complet

Ces remplacements concernent les absences de trente (30) jours ou plus des ambulanciers titulaires de postes de l'horaire de base. Le commis aux horaires doit alors communiquer par téléphone avec chacun de ces ambulanciers, par ordre d'ancienneté, pour leur proposer un remplacement en bloc. Les remplacements disponibles sont énumérés par une application informatique.

- Techniciens à temps partiel :

Le commis aux horaires prépare une liste des techniciens ambulanciers à temps partiel ayant plus de 20 jours de disponibilité dont une fin de semaine sur deux sur une même plage horaire (exemple : 20 quarts de soir). Le commis aux horaires doit alors communiquer par téléphone avec chacun de ces ambulanciers paramédicaux, par ordre d'ancienneté, pour leur proposer un remplacement en bloc. Les remplacements disponibles sont énumérés par une application informatique en ordre de respect des préférences (plages horaires, secteur, durée des quarts) de l'ambulancier concerné. Celui-ci choisit l'horaire qu'il préfère selon ses préférences, mais aussi selon l'heure de départ des quarts et le co-équipier avec qui il travaillera.

Offrir les quarts à la pièce

Les disponibilités des employés à temps partiel ne permettent pas de combler tous les remplacements par bloc. Ainsi, les horaires de base sans titulaire et non comblés suite à l'étape précédente deviennent des quarts à la pièce. Deux semaines avant le début du mois, l'attribution des quarts à la pièce est réalisée. Il s'agit de l'étape la plus longue et complexe de la gestion des horaires mensuels. Pour ce faire, le module d'assignation des quarts à la pièce classe les ambulanciers à temps partiel n'ayant pas reçu de remplacement en bloc, par ordre d'ancienneté. Le commis doit alors analyser de façon individuelle le dossier de chacun de ces employés.

En fonction des préférences émises par l'ambulancier, on propose une série de quarts disponibles pour concevoir son horaire mensuel. Suite à l'analyse de ces propositions, le commis aux horaires contacte le techniciens ambulanciers et lui propose les quarts (tout en respectant les quotas) qui semblent s'ajuster le mieux aux besoins de l'employé tout en

tendant de respecter les règles de confection. Le commis choisit le premier salarié de la liste de rappel et évalue sa disponibilité. Selon cette évaluation, le commis essaie de le rejoindre ou lui laisse un message sur son répondeur tout en enregistrant l'offre dans son dossier. S'il le rejoint, il lui offre l'assignation et enregistre son acceptation ou son refus dans une application informatique. Il faut noter aussi que la durée minimale d'un quart de travail est de trois (3) heures (normes de travail) et Il faut signaler ici que les préférences des employés servent à la confection des quarts à la pièce.

Offrir les quarts en temps supplémentaires

Suite à la confection des horaires mensuels, certains ajustements quotidiens doivent être effectués de façon continue pour tenir compte des congés de dernière minute, des retours au travail imprévus ou d'autres événements : festivals, conditions climatiques, *etc.* Cette dernière étape est réalisée grâce au module de gestion des absences et des congés, au module de gestion des quarts ponctuels et au module d'attribution des quarts à la pièce du système horaire. On libère alors les quarts de travail concernés. Quant au module de gestion des quarts ponctuels, une application offre la possibilité de créer de nouveaux quarts de travail (manuellement) afin de pallier aux besoins de service. L'offre de quarts en temps supplémentaire fait partie des ajustements quotidiens du commis aux horaires.

Le commis offre les quarts de travail supplémentaire aux employés, à tour de rôle, selon une liste d'ancienneté établie par le service des horaires. La réalisation de quarts en temps supplémentaire est optionnelle pour les ambulanciers. Ainsi, chacun peut choisir de ne pas être inscrit sur la liste de temps supplémentaire. Toutefois, la majorité des ambulanciers, à temps plein et temps partiel, sont inscrits sur cette liste. L'employeur ne peut exiger d'une personne salariée d'effectuer plus de seize heures, incluant sa journée normale, par période de vingt-quatre heures. En plus, tout travail effectué en surplus de la semaine normale de travail est considéré comme des heures supplémentaires.

Offrir les quarts pour les événements spéciaux

Les événements spéciaux sont offerts aux ambulanciers paramédicaux qui se sont inscrits sur la liste des événements spéciaux 10 jours avant la date de l'événement. Un événement spécial

est un événement organisé qui nécessite l'ajout d'un véhicule ambulancier ou une affectation d'un véhicule ambulancier des opérations régulières en service au moment de l'événement. Cependant, un événement qui requiert la présence du Groupe d'Intervention Médical Tactique (GIMT) ou toute autre équipe spécialisée n'est pas considéré comme un événement spécial.

Les événements spéciaux sont attribués aux ambulanciers selon les conditions suivantes :

- Les événements spéciaux sont attribués par ordre d'ancienneté et à tour de rôle à la personne salariée détentrice d'un poste du titre d'emploi convenable à cette fonction.
- Si une personne salariée est à l'horaire de travail au moment où vient son tour pour un événement spécial, son équipe est déplacée de son quart pour la durée de l'événement spécial, si elle le désire.
- Les événements spéciaux sont d'une durée minimale de sept heures et trois quarts (7h45min) de rémunération.
- La personne salariée qui refuse un événement spécial sera considérée l'avoir fait au sens du tour de rôle.
- Exception : Pour les événements spéciaux qui ont une durée de moins de quatre heures, les équipes régulières qui sont sur la route effectuent ces événements spéciaux.

ANNEXE III

EXEMPLE DES RÉSULTATS OBTENUS

Cette annexe présente un exemple des résultats obtenus de la solution du test 1 (couverture de la demande et répartition par secteur et centre opérationnel). La solution obtenue permet de bien répondre à l'ensemble des contraintes de planification des SPU et une bonne couverture de la demande. Notre plateforme est aussi performante en termes de temps d'exécution et de résolution et de gestion de la flotte des véhicules (économie de l'ordre de 15 %). Notre modèle produit de bons horaires et de bonnes solutions et sa flexibilité le rend très utile dans un contexte d'évaluation d'un très grand nombre de scénarios différents les uns des autres et à plusieurs niveaux.

Couverture de la demande pour la première et la deuxième semaine

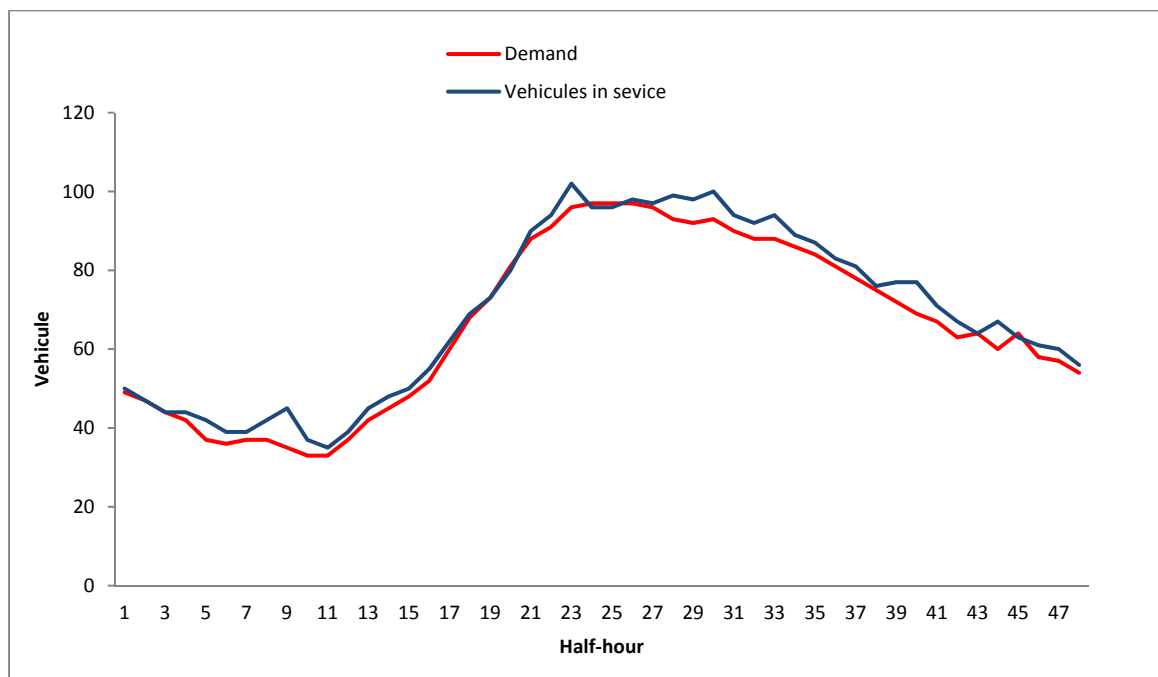


Figure-A III.1 Comparaison de l'offre et de la demande pour la solution du test 1 (Semaine 1 - Lundi)

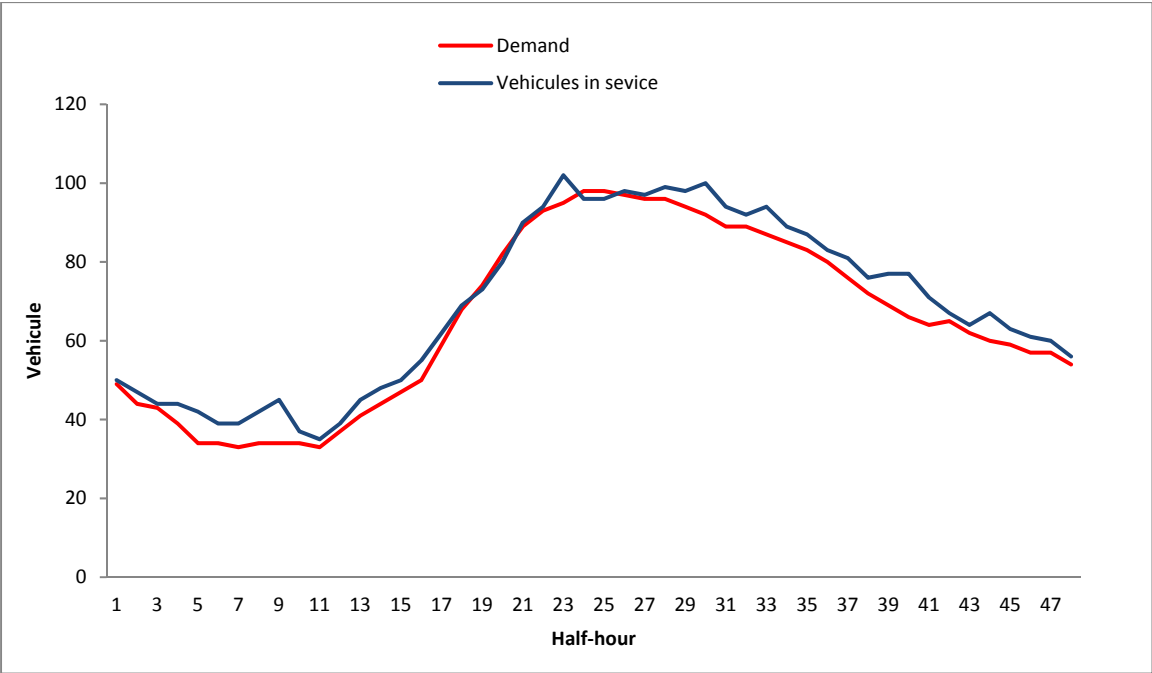


Figure-A III.2 Comparaison de l'offre et de la demande pour la solution du test 1 (Semaine 1 - Mardi)

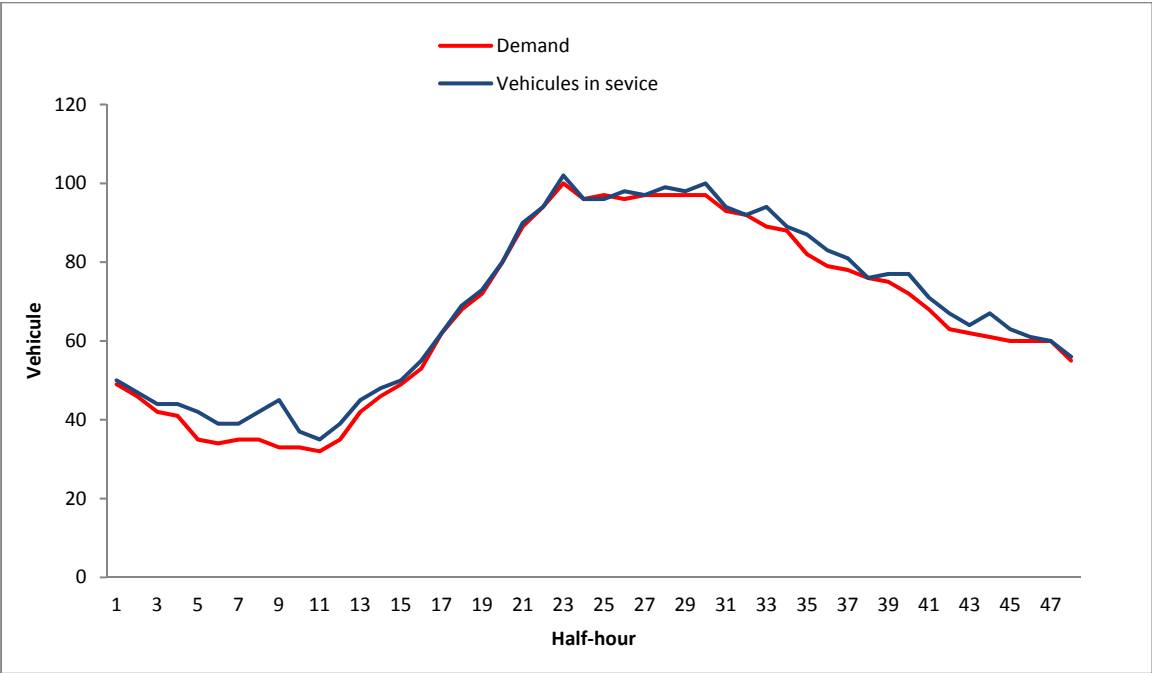


Figure-A III.3 Comparaison de l'offre et de la demande pour la solution du test 1 (Semaine 1 - Mercredi)

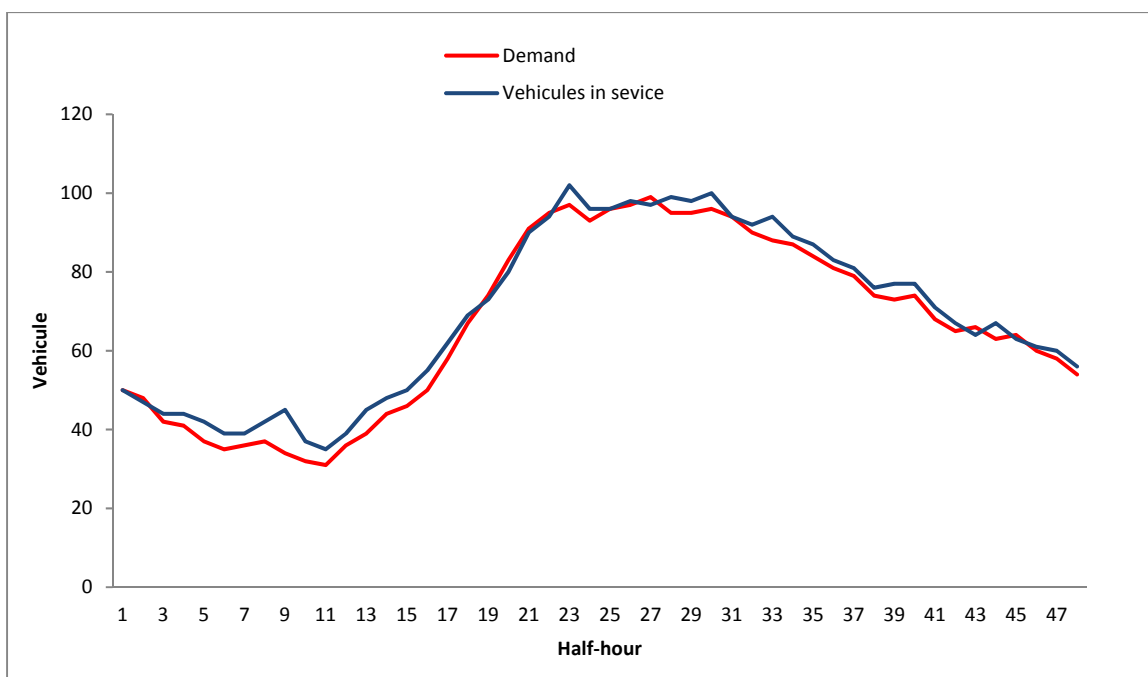


Figure-A III.4 Comparaison de l'offre et de la demande pour la solution du test 1
(Semaine 1 - Jeudi)

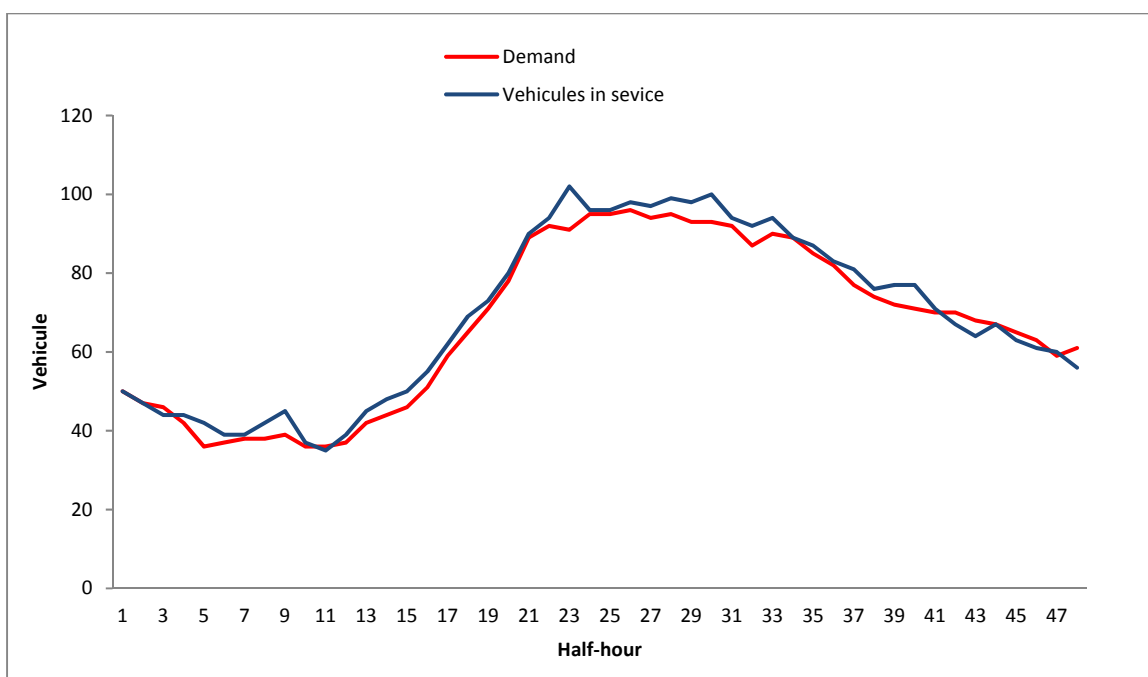


Figure-A III.5 Comparaison de l'offre et de la demande pour la solution du test 1
(Semaine 1 - Vendredi)

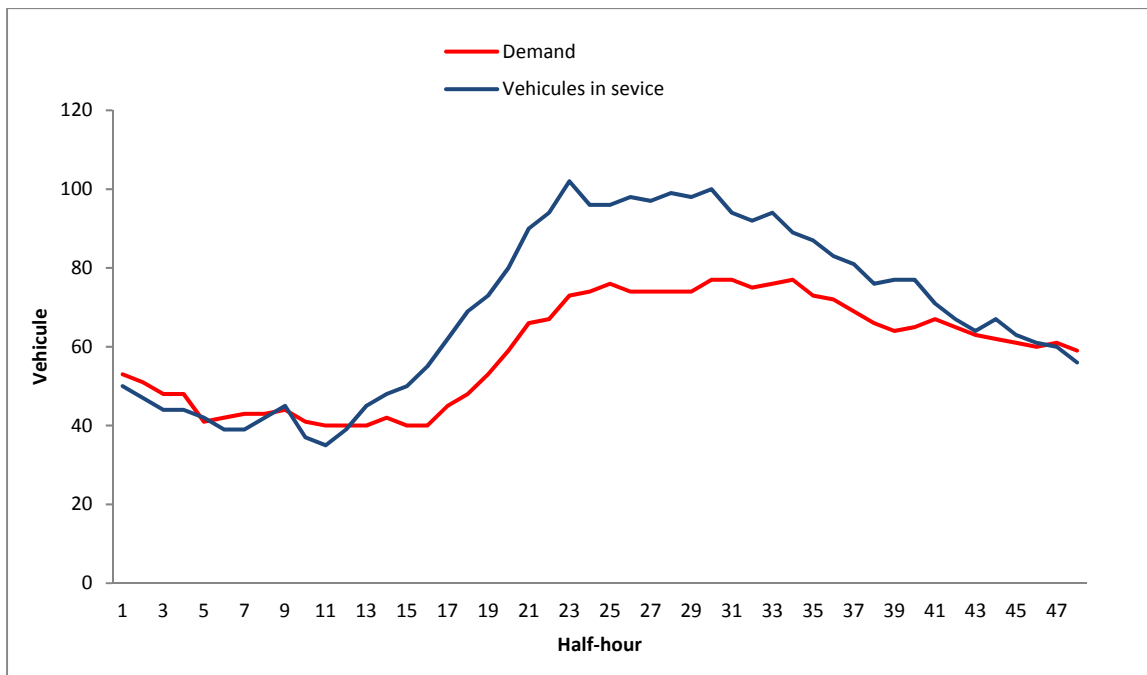


Figure-A III.6 Comparaison de l'offre et de la demande pour la solution du test 1 (Semaine 1 - Samedi)

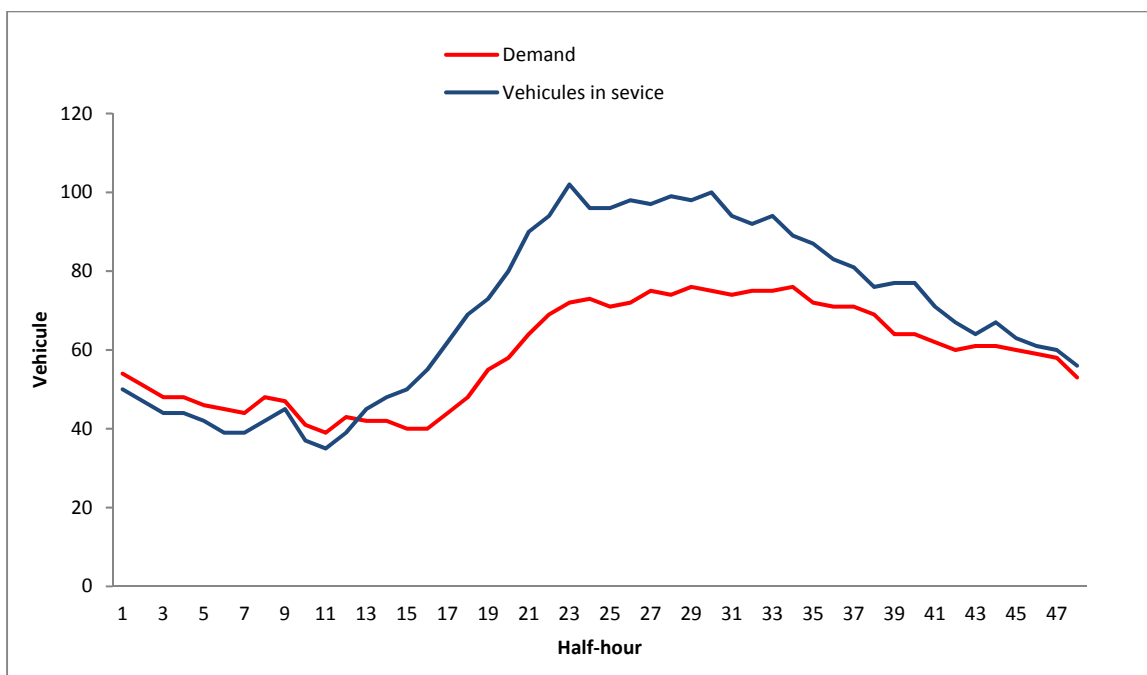


Figure-A III.7 Comparaison de l'offre et de la demande pour la solution du test 1 (Semaine 1 - Dimanche)

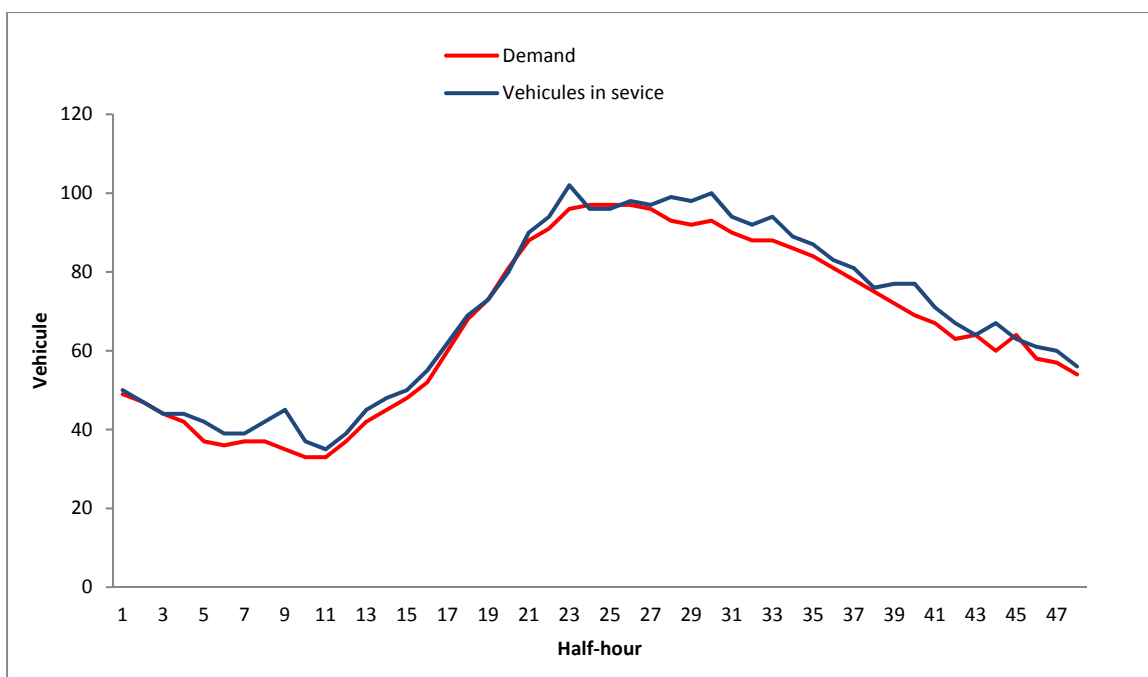


Figure-A III.8 Comparaison de l'offre et de la demande pour la solution du test 1
(Semaine 2 - Lundi)

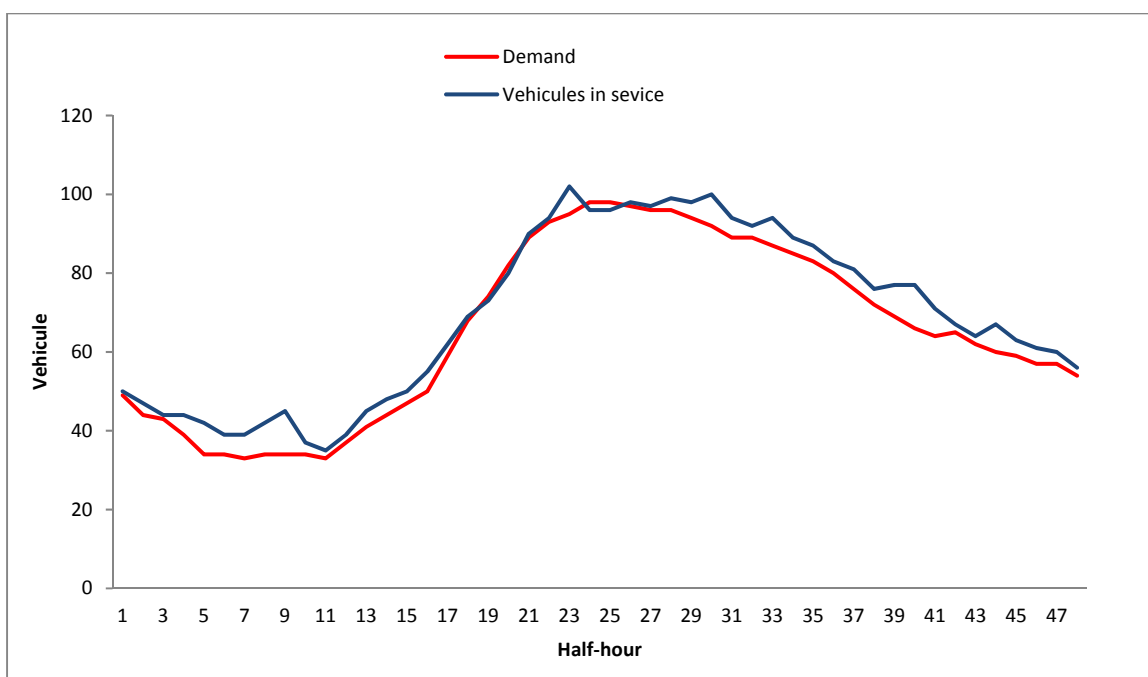


Figure-A III.9 Comparaison de l'offre et de la demande pour la solution du test 1
(Semaine 2 - Mardi)

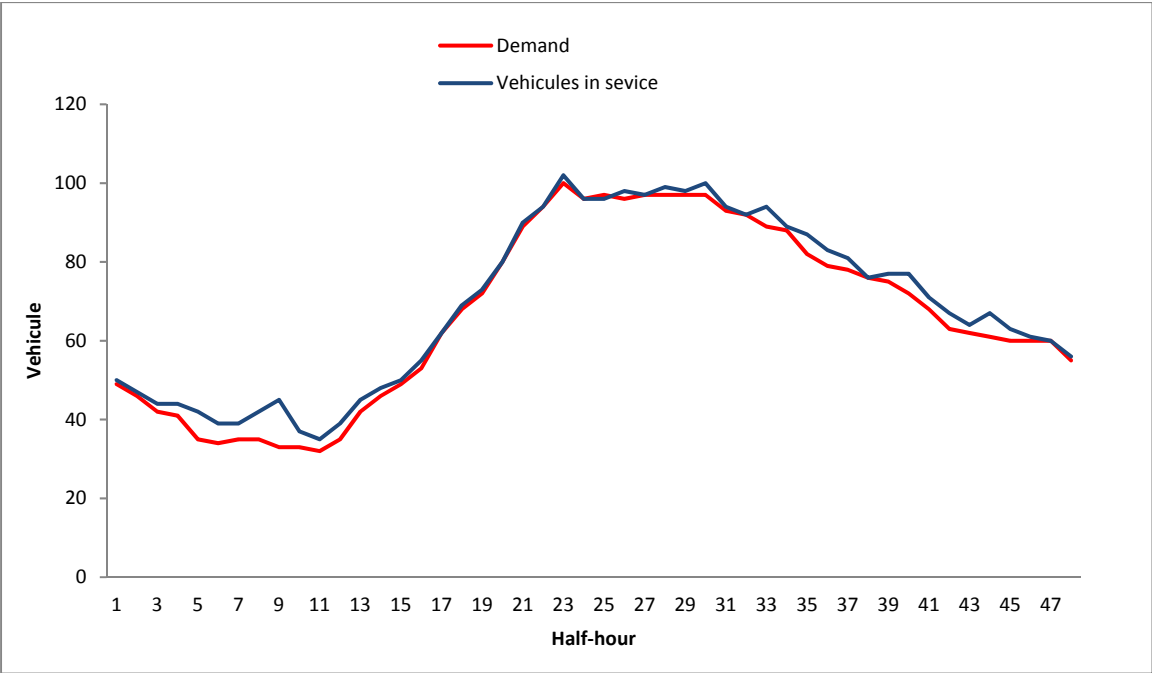


Figure-A III.10 Comparaison de l'offre et de la demande pour la solution du test 1
(Semaine 2 - Mercredi)

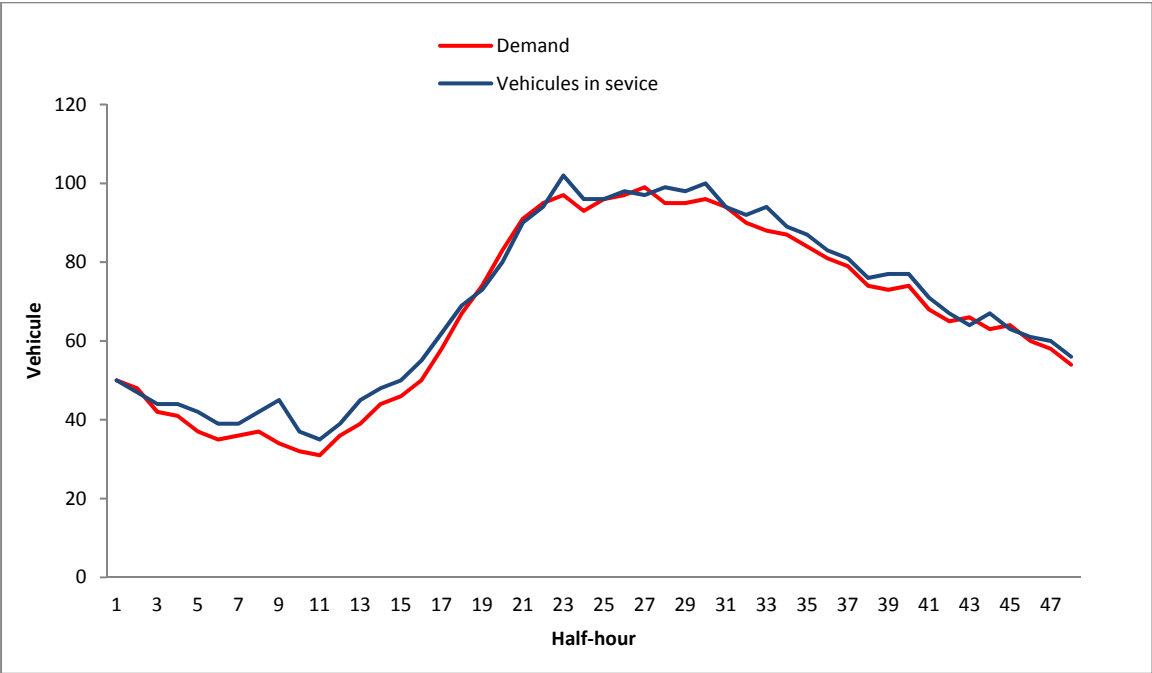


Figure-A III.11 Comparaison de l'offre et de la demande pour la solution du test 1
(Semaine 2 - Jeudi)

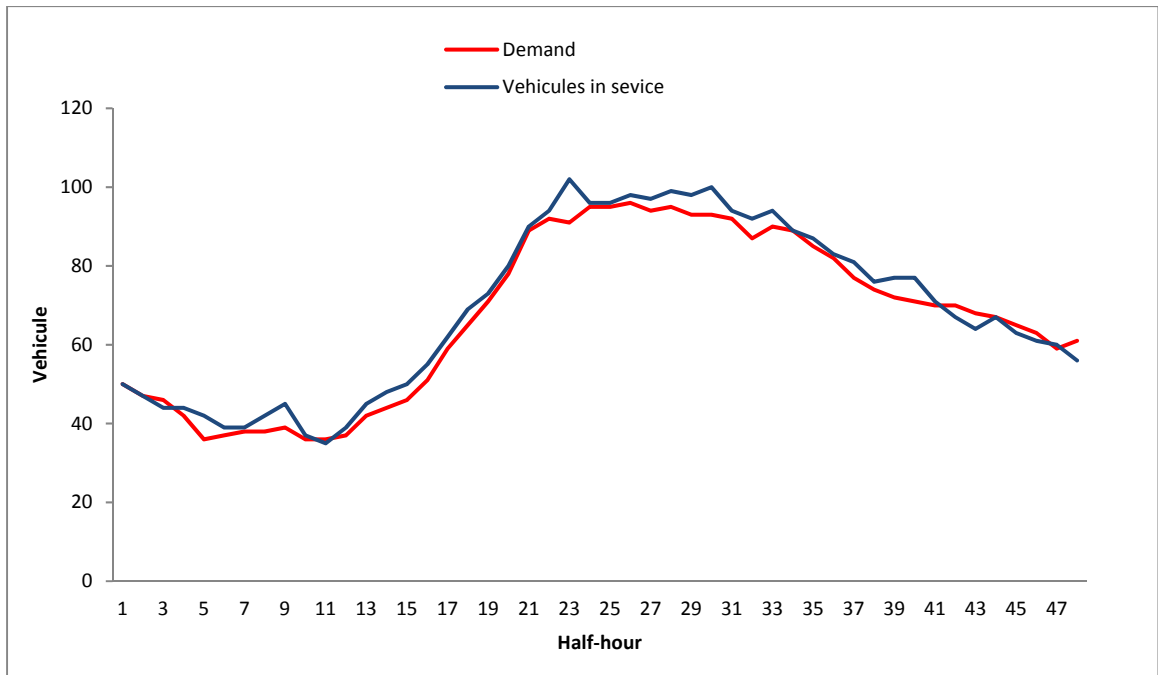


Figure-A III.12 Comparaison de l'offre et de la demande pour la solution du test 1 (Semaine 2 - Vendredi)

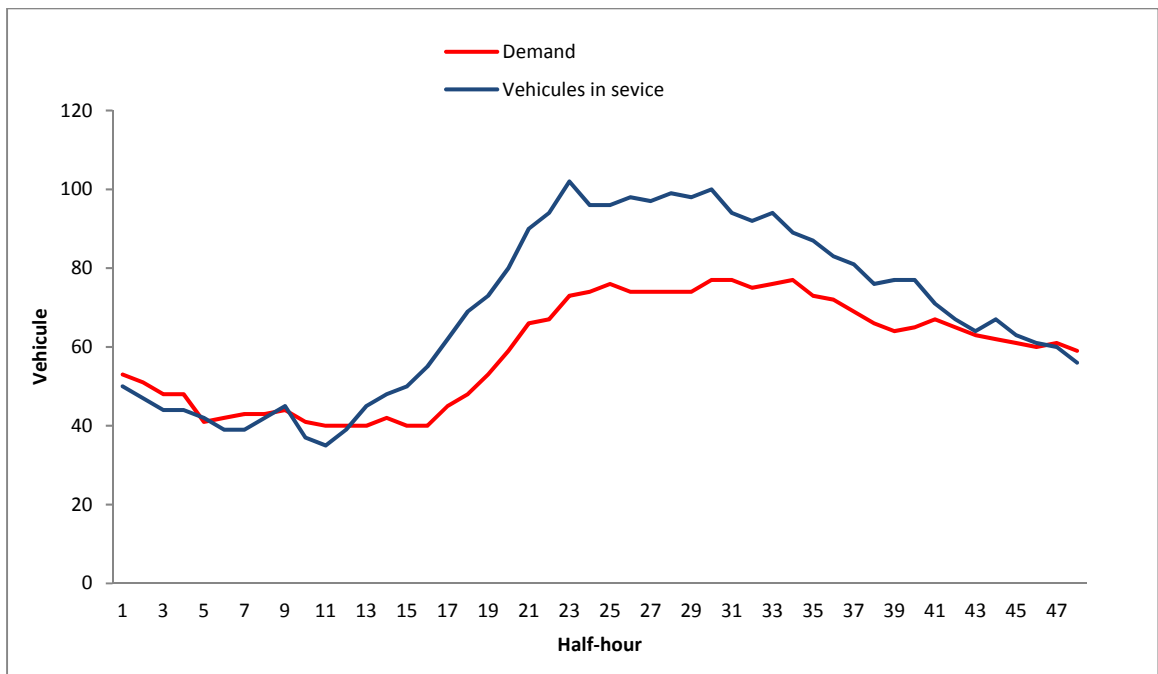


Figure-A III.13 Comparaison de l'offre et de la demande pour la solution du test 1 (Semaine 2 - Samedi)

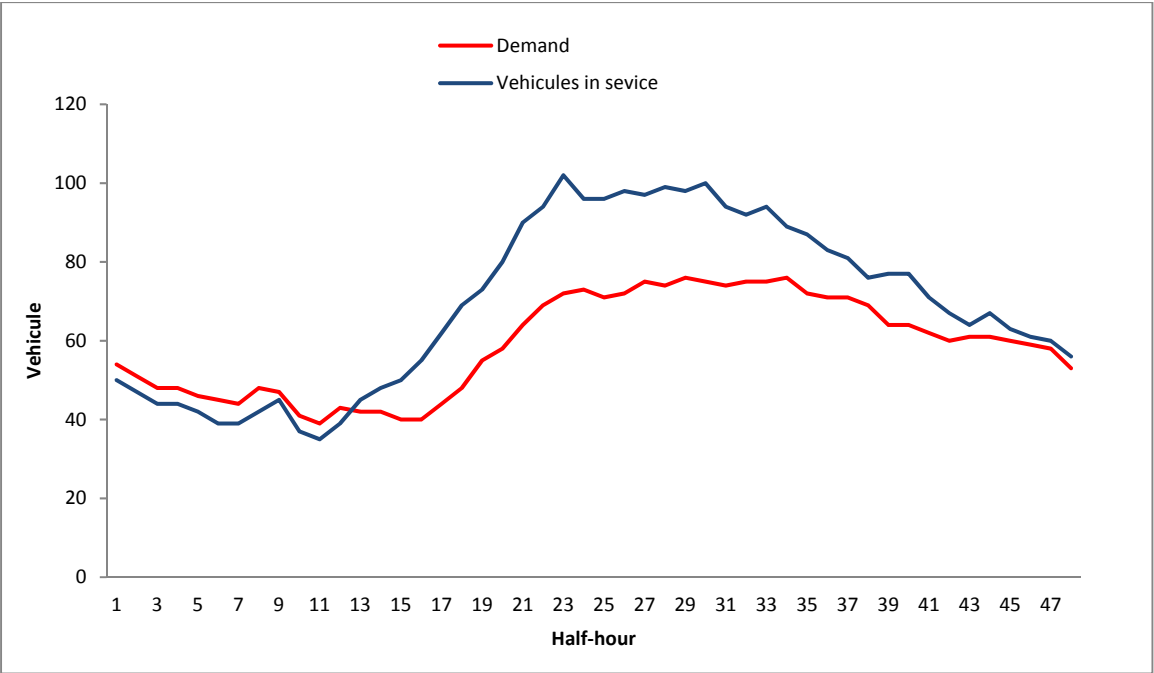


Figure-A III.14 Comparaison de l'offre et de la demande pour la solution du test 1
(Semaine 2 - Dimanche)

Répartition des horaires par secteur

Tableau-A III.1 Répartition des types d'horaires par secteur

Secteur	Combinaison	Nombre
S1 - Centre Nord	814 - 10h	5
S1 - Centre Nord	614 - 10h	8
S1 - Centre Nord	1014 - 08h	18
S1 - Centre Nord	714 - 12h	64
S2 - Nord	614 - 10h	2
S2 - Nord	814 - 10h	3
S2 - Nord	1014 - 08h	20
S2 - Nord	714 - 12h	56
S3 - Est	814 - 10h	1
S3 - Est	614 - 10h	5
S3 - Est	1014 - 08h	6
S3 - Est	714 - 12h	24
S4 - Ouest	614 - 10h	3
S4 - Ouest	1014 - 08h	5
S4 - Ouest	714 - 12h	22
S5 - Centre Sud	814 - 10h	1
S5 - Centre Sud	614 - 10h	2

S5 - Centre Sud	1014 - 08h	13
S5 - Centre Sud	714 - 12h	40

Tableau-A III.2 Exemple de la répartition détaillée des horaires par secteur

Secteur	Combinaison	Nombre	Cycle Binaire	Début	Fin	Pause
S1 - Centre Nord	1014 - 08h	1	01110111011110	16:00:00	00:00:00	20:00:00
S1 - Centre Nord	1014 - 08h	1	01111011101110	16:00:00	00:00:00	20:30:00
S1 - Centre Nord	714 - 12h	3	01100111001100	12:00:00	00:00:00	17:00:00
S1 - Centre Nord	714 - 12h	3	01100111001100	12:00:00	00:00:00	18:30:00
S1 - Centre Nord	714 - 12h	6	10011000110011	12:00:00	00:00:00	18:30:00
S5 - Centre Sud	1014 - 08h	1	01111011101110	16:00:00	00:00:00	20:30:00
S5 - Centre Sud	1014 - 08h	1	01110111011110	10:00:00	18:00:00	13:00:00
S5 - Centre Sud	714 - 12h	1	01100111001100	06:30:00	18:30:00	12:00:00
S5 - Centre Sud	714 - 12h	1	01100111001100	07:30:00	19:30:00	12:00:00
S5 - Centre Sud	714 - 12h	1	10011000110011	08:30:00	20:30:00	14:30:00
S3 - Est	1014 - 08h	1	11011100111101	16:00:00	00:00:00	20:30:00
S3 - Est	714 - 12h	1	01100111001100	12:00:00	00:00:00	18:30:00
S3 - Est	714 - 12h	1	01100111001100	16:30:00	04:30:00	21:00:00
S3 - Est	714 - 12h	1	10011000110011	17:00:00	05:00:00	22:00:00
S3 - Est	614 - 10h	1	00000111001110	20:00:00	06:00:00	01:00:00
S2 - Nord	714 - 12h	1	10011000110011	10:30:00	22:30:00	16:00:00
S2 - Nord	714 - 12h	1	01100111001100	11:00:00	23:00:00	16:30:00
S2 - Nord	714 - 12h	1	01100111001100	11:00:00	23:00:00	17:30:00
S2 - Nord	714 - 12h	1	10011000110011	11:00:00	23:00:00	16:00:00
S2 - Nord	1014 - 08h	1	01111100111110	15:30:00	23:30:00	20:00:00
S4 - Ouest	714 - 12h	1	01100111001100	08:30:00	20:30:00	14:30:00
S4 - Ouest	714 - 12h	1	01100111001100	09:00:00	21:00:00	15:30:00
S4 - Ouest	714 - 12h	1	01100111001100	09:30:00	21:30:00	16:00:00
S4 - Ouest	714 - 12h	1	10011000110011	10:00:00	22:00:00	16:30:00

ANNEXE IV

RÉSULTATS DES TESTS (MODÈLE D'OPTIMISATION)

L'évaluation de la qualité des résultats est simple à faire en ce qui concerne certains éléments comme la couverture de la demande en comparant et vérifiant si chaque ligne des unités de l'offre (colonne Offre) est supérieure ou égale à celle de la demande (colonne Demande) pour chaque demi-heure de la période de solution (voir le Tableau-A VI.4, Tableau-A VI.5 et Tableau-A VI.6). Toutefois, en ce qui concerne d'autres éléments comme la qualité des horaires individuels, l'évaluation est moins simple à faire. En collaboration avec le service des statistiques et de la recherche opérationnelle de la Corporation d'Urgences-Santé, nous avons donc créé une liste de mesures permettant d'évaluer la qualité d'un horaire dans son ensemble. Ces mesures sont les suivantes :

- Unités de demande couvertes sur l'horizon total.
- Nombre de véhicules requis pour chaque période de l'horizon.
- Nombre d'arrivées de véhicules pour chaque période de l'horizon.
- Pourcentage des quarts commençant à des heures indésirables.
- Pourcentage des quarts finissant à des heures indésirables.
- Pourcentage des pauses situées à un moment indésirable dans le quart.

Ces critères représentent ceux utiles pour la Corporation d'Urgences-santé afin d'évaluer la qualité d'un horaire au niveau du respect de la demande, du respect du nombre disponible de véhicules et de techniciens ambulanciers (T.A), au niveau ergonomique, et surtout au niveau de son potentiel d'implantation.

Paramétrage

Notre modèle contient différents éléments (voir Tableau 3.6, Chapitre 3). La grande majorité de ceux-ci font partie de la phase 1 (création de la banque des patrons horaires, voir le paragraphe 3.3.1 du Chapitre 3). La phase 2 ne nécessite que peu de paramétrage (voir paragraphe 3.3.2, Chapitre 3). La taille du problème est un élément influant de manière très

importante sur la durée de résolution. Cet élément affecte tout aussi bien la résolution de la phase 1 que celle de la phase 2. La taille du problème est définie par : le nombre d'employés et la durée l'horizon de planification. Une instance normale possède un horizon de 14 jours et entre 250 et 300 paires de techniciens ambulanciers. Dans ces conditions, il est possible d'obtenir une solution jugée satisfaisante généralement entre 10 minutes et 2 heures de temps de calcul sur ordinateur de bureau (Intel Core Duo, CPU E6850 avec 3 GHz et 3,48 G.B de RAM).

Le temps de résolution est très variable puisqu'il dépend fortement du nombre de contraintes et de variables intégrées au modèle à résoudre. Généralement, plus un grand nombre de contraintes et variables sont activées, plus le temps de résolution est long. Les tests effectués dans le présent document sont tous d'une taille 298 horaires (278 temps complet et 20 temps partiel) sur un horizon de 14 jours. Ceci correspond à un horaire tel qu'étudié présentement par US, soit pour 596 techniciens ambulanciers dont 556 sont des temps complet et 40 des temps partiel. Le Tableau-A VI.1 présente ces données sur la taille du problème et des variables utilisées pour chacun de nos trois tests.

Tableau-A VI.1 : Variables utilisées pour chaque test

	Test 1	Test 2	Test 3
Quantité maximale de véhicules (Integer)	110	115	123
Quantité maximale de véhicules additionnels (Integer)	0	2	5
Demande (de 2012-2013, discrétisé à la demi-heure)	672 lignes		
Quantité maximale des temps complet (Integer)	278		
Quantité maximale des temps partiel (Integer)	20		
Cycle de semaine (Integer)	1	1	1
Coût de véhicule supplémentaire (Float)	1000	1000	1000
Quantité maximale des horaires (Integer)	999	999	Max
Poids d'écart de surplus (Float), écart Maximal entre deux semaines (Float), Poids d'écart de carence (Float), Poids Buffer1C (Float), Poids Buffer 2C (Float), Poids Buffer 3C (Float), Poids Buffer 1S (Float), Poids Buffer 2S (Float), Poids Buffer 3S (Float)	200		
Types de cycle	6 jours sur 14, 7 jours sur 14, 8 jours sur 14, 10 jours sur 14		

Types de journées	8 heures, 10 heures et 12 heures
Heures de début et de fin	5:00 au plus tôt et 23:30 au plus tard.

La variable d'écart est un *buffer*. Elle prend une valeur négative si la demande est plus forte que l'offre de service et une valeur positive sinon. La solution se détériore donc si l'offre de service n'atteint pas la demande et elle s'améliore si le niveau de service est supérieur à la demande. Le coût de chaque horaire est défini par le nombre d'heures de travail (les horaires qui ont le même type de cycle et même type de journée ont le même coût). Le coût d'un véhicule supplémentaire est fixé à 1000 (configurable). Le coût d'une unité d'écart entre l'offre et demande est fixé à 200 (configurable).

Les différentes paires d'employés peuvent être divisées en temps complets et en temps partiel. L'utilisation d'horaires de temps partiel a un avantage très important : elle permet de diminuer le surplus d'offre présent durant les journées de semaine (du lundi au vendredi). En effet, la contrainte « une fin de semaine de congé sur deux semaines » est tellement restrictive qu'elle cause automatiquement un surplus d'offre durant les journées de semaine lorsqu'on doit couvrir entièrement la demande de fin de semaine en utilisant uniquement des horaires temps complet. De plus, les horaires temps partiel sont beaucoup plus faciles à manipuler à cause du nombre inférieur de jours qui y sont travaillés, ce qui leur permet une plus grande flexibilité dans l'utilisation.

Les pénalités dans le modèle

La pénalité 1 représente la pénalité attribuée à une unité d'écart entre l'offre et la demande pour une période donnée lorsque l'offre ne couvre pas entièrement la demande (Ligne 3.4 de la fonction objectif, Chapitre 3). La contrainte de couverture de la demande contraint l'offre à être supérieure ou égale à la demande pour toutes les périodes de l'horizon où c'est faisable. Lorsque la demande ne peut être entièrement couverte pour une période donnée, la fonction-objectif est pénalisée. Les surplus n'ont aucune conséquence directe négative sur la qualité de la solution, par contre les conséquences indirectes d'un surplus d'offre sont la nécessité d'ajouter des véhicules supplémentaires à la flotte lorsque les surplus d'offre se retrouvent en

période de pointe. Cette situation est gérée par la contrainte d'ajout d'un véhicule supplémentaire à la flotte de véhicule disponible. Le Tableau-A VI.2 présente les valeurs de la pénalité associée à une violation de la contrainte de couverture de la demande. Pour les tests, la valeur de cette pénalité est 2000.

La pénalité 2 représente la pénalité due à l'acquisition d'un véhicule supplémentaire à la flotte disponible (Ligne 3.5 de la fonction-objectif, Chapitre 3). La contrainte de respect du nombre de véhicules disponibles dans la flotte est très importante pour les deux raisons suivantes : 1) une augmentation du nombre de véhicules nécessaires se produit généralement en parallèle avec une augmentation de l'achalandage des dépôts de véhicules, ce qui produit des goulots d'étranglement lors des sorties et des retours de véhicules. Ces goulots d'étranglement augmentent la complexité de la gestion de la flotte de véhicules et réduisent la disponibilité des véhicules et 2) le coût de l'ajout d'un véhicule supplémentaire est très dispendieux, soit aux environs de 200 000 \$ sur cinq ans. Ce coût n'inclut pas les coûts supplémentaires produits par les problèmes de gestion causés par l'augmentation de la taille de la flotte et par l'augmentation de l'achalandage des dépôts de véhicules. Il est donc impératif de limiter autant que possible l'ajout de véhicules supplémentaires à la flotte. Le Tableau-A VI.2 montre la valeur de la pénalité associée à l'ajout d'un véhicule supplémentaire dans la flotte (les autres contraintes et paramètres utilisés et intégrés se trouvent dans les Tableaux 3.6 et 3.9, Chapitre 3). Il suffit de lui attribuer un coût suffisamment fort pour qu'un véhicule supplémentaire ne soit ajouté à la flotte que lorsqu'il n'y a aucune alternative possible.

Tableau-A VI.2 : Valeurs numériques recommandées pour les pénalités 1 et 2

	Test 1	Test 2	Test 3
Pénalité 1	2000		
Pénalité 2	1000		

Temps de résolution et critères d'arrêts

Les critères d'arrêts utilisés durant nos tests sont énoncés en fonction du nombre d'itérations sans amélioration de la meilleure solution connue. Il est toutefois possible d'en énoncer un de façon différente, par exemple en fonction du temps écoulé depuis le début de la résolution.

Le choix des critères d'arrêt ne concerne toutefois que la phase 2. La phase 1 est exécuté jusqu'à l'obtention de la solution optimale pour toutes les instances. Les critères d'arrêt utilisés pour les tests 1, 2 et 3 sont présentés sur le Tableau-A VI.3.

Tableau-A VI.3 : Critères d'arrêt des tests (modèle)

	Test 1	Test 2	Test 3
Critère d'arrêt	1000 itérations sans amélioration de la meilleure solution connue.		

Notre système fournit rapidement de bonnes solutions sur des machines de bureau. Le temps de calcul pour les tests est présenté dans la Figure-A VI.1. Ce temps dépend du nombre de variables et contraintes dans le modèle d'optimisation. La flexibilité de ce système permet de tester et d'évaluer un très grand nombre de scénarios. Les horaires créés sont ergonomiques et respectent la demande facilement lorsque le nombre d'employés est suffisant.

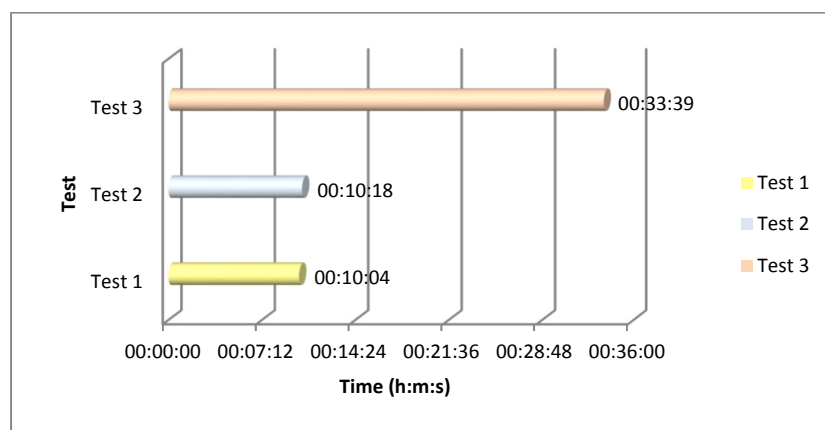


Figure-A VI.1 : Temps de calcul pour chaque test

Analyse des résultats

Notre système de planification des horaires des T.A est composé principalement de deux (2) éléments : la base de données et le système d'optimisation. L'analyse de la structure du système est donc faite selon ces axes. La base de données utilise Microsoft SQL Server afin de faciliter le développement, l'implantation et l'utilisation. En effet, les données entrantes sont stockées dans la base de données. La construction des patrons contenus dans la base de données est automatisée et le transfert de données vers le système d'optimisation est complètement automatisé. La base de données contient tous les patrons des horaires individuels utilisés par le système d'optimisation qui choisit ceux qui conviennent le mieux à la solution parmi les patrons présélectionnés par l'utilisateur. L'avantage que le stockage de tous ces patrons procure à notre modèle est qu'il est simple de limiter les structures d'horaires individuels possibles avec grande précision sans devoir utiliser de contraintes complexes dans le système d'optimisation. Ainsi l'utilisateur est certain d'obtenir uniquement des horaires individuels désirés dans son modèle horaire final (voir les paragraphes 3.3.1 et 3.3.2, Chapitre 3).

Le système d'optimisation effectue une itération de génération d'un ensemble de patrons d'horaires individuels basée sur la programmation par contraintes, qui sont ensuite utilisés par un programme linéaire en nombre entier. Le système d'optimisation utilise différents types de durées de quart (8 h, 10 h, 12 h) et prend en compte les pauses repas. Le positionnement ergonomique des pauses avant l'optimisation tel que fait par notre système permet de garantir qu'elle soit située à un emplacement convenable pour le technicien ambulancier.

La qualité de l'horaire est évaluée selon trois (3) axes : 1) le respect de la demande, 2) la qualité de la gestion de la flotte de véhicules et 3) la qualité des horaires individuels.

Respect de la demande

Notre système d'optimisation utilise un nombre prédéfini d'employés et ajoute des horaires jusqu'à ce que la demande soit entièrement couverte à partir de cette quantité d'employés

prédéterminée. La seule contrainte réellement limitative au niveau de la couverture des fins de semaine chez US est la contrainte stipulant que chaque horaire individuel ne peut travailler plus d'une fin de semaine sur deux. Traduite en termes de quarts, cette contrainte signifie que sur deux semaines, chaque horaire individuel ne peut travailler plus de deux quarts durant des journées de fins de semaines. Cependant, aucune distinction n'est faite en fonction de la durée du quart. Ainsi, un employé travaillant des quarts de 12 heures pourra travailler un total de 24 heures de fin de semaine sur un horizon de deux (2) semaines, un employé ayant des quarts de 10 heures pourra travailler un total de 20 heures de fin de semaine sur deux (2) semaines et un employé ayant des quarts de 8 heures ne pourra travailler qu'un total de 16 heures de fin de semaine.

Donc, un employé travaillant des quarts de 12 heures peut couvrir plus de 45 % plus d'heures de fin de semaine qu'un employé travaillant des quarts de 8 heures, alors qu'un employé travaillant des quarts de 10 heures peut quant à lui travailler presque 25 % plus d'heures de fin de semaine qu'un employé travaillant des quarts de 8 heures. L'utilisation des quarts plus longs procure un grand avantage pour la couverture de la demande de fin de semaine. Les Tableau-A VI.4, Tableau-A VI.5 et Tableau-A VI.6 présentent les données d'offre qui couvre bien la demande de service pour toutes les périodes de planification pour la journée du Samedi de la Semaine N° 1. Les écarts entre l'offre et la demande sont positifs pour 81.25 % des cas pour le test 1, 87.50 % des cas pour le test 2 et 81.25 % des cas pour le test 3. Chaque écart positif se traduit par une couverture à 100 % et plus de la demande pour la demi-heure en question. La période de planification est définie sur 14 jours, soit 672 demi-heures commençant le Dimanche. L'Id demi-heure 289 représente la première demi-heure de travail du Samedi de la Semaine N°1 commençant à minuit tel que enregistré et identifié dans la base de données de notre système de planification. L'Id demi-heure 336 représente la dernière demi-heure de travail du Samedi de la Semaine N°1 commençant à 23:30 comme enregistrée et identifiée dans la base de données du système de planification.

Tableau-A VI.4 : Comparaison de l'offre et de la demande par le test 1
(Samedi de la Semaine N° 1)

Semaine	Jour	Id demi-heure	Demande	Offre	Écart
Semaine N° 1	Samedi	289	53	55	2
Semaine N° 1	Samedi	290	51	52	1
Semaine N° 1	Samedi	291	48	49	1
Semaine N° 1	Samedi	292	48	49	1
Semaine N° 1	Samedi	293	41	49	8
Semaine N° 1	Samedi	294	42	46	4
Semaine N° 1	Samedi	295	43	45	2
Semaine N° 1	Samedi	296	43	48	5
Semaine N° 1	Samedi	297	44	51	7
Semaine N° 1	Samedi	298	41	44	3
Semaine N° 1	Samedi	299	40	41	1
Semaine N° 1	Samedi	300	40	44	4
Semaine N° 1	Samedi	301	40	44	4
Semaine N° 1	Samedi	302	42	43	1
Semaine N° 1	Samedi	303	40	42	2
Semaine N° 1	Samedi	304	40	42	2
Semaine N° 1	Samedi	305	45	45	0
Semaine N° 1	Samedi	306	48	51	3
Semaine N° 1	Samedi	307	53	56	3
Semaine N° 1	Samedi	308	59	58	-1
Semaine N° 1	Samedi	309	66	67	1
Semaine N° 1	Samedi	310	67	69	2
Semaine N° 1	Samedi	311	73	75	2
Semaine N° 1	Samedi	312	74	73	-1
Semaine N° 1	Samedi	313	76	74	-2
Semaine N° 1	Samedi	314	74	73	-1
Semaine N° 1	Samedi	315	74	73	-1
Semaine N° 1	Samedi	316	74	73	-1
Semaine N° 1	Samedi	317	74	75	1
Semaine N° 1	Samedi	318	77	77	0
Semaine N° 1	Samedi	319	77	75	-2
Semaine N° 1	Samedi	320	75	75	0

Semaine N° 1	Samedi	321	76	77	1
Semaine N° 1	Samedi	322	77	78	1
Semaine N° 1	Samedi	323	73	78	5
Semaine N° 1	Samedi	324	72	76	4
Semaine N° 1	Samedi	325	69	76	7
Semaine N° 1	Samedi	326	66	72	6
Semaine N° 1	Samedi	327	64	72	8
Semaine N° 1	Samedi	328	65	71	6
Semaine N° 1	Samedi	329	67	69	2
Semaine N° 1	Samedi	330	65	66	1
Semaine N° 1	Samedi	331	63	64	1
Semaine N° 1	Samedi	332	62	65	3
Semaine N° 1	Samedi	333	61	61	0
Semaine N° 1	Samedi	334	60	60	0
Semaine N° 1	Samedi	335	61	59	-2
Semaine N° 1	Samedi	336	59	56	-3

Tableau-A VI.5 : Comparaison de l'offre et de la demande par le test 2
(Samedi de la Semaine N° 1)

Semaine	Jour	Id demi-heure	Demande	Offre	Écart
Semaine N° 2	Samedi	625	53	54	1
Semaine N° 2	Samedi	626	51	50	-1
Semaine N° 2	Samedi	627	48	50	2
Semaine N° 2	Samedi	628	48	49	1
Semaine N° 2	Samedi	629	41	47	6
Semaine N° 2	Samedi	630	42	46	4
Semaine N° 2	Samedi	631	43	46	3
Semaine N° 2	Samedi	632	43	48	5
Semaine N° 2	Samedi	633	44	49	5
Semaine N° 2	Samedi	634	41	42	1
Semaine N° 2	Samedi	635	40	41	1
Semaine N° 2	Samedi	636	40	45	5
Semaine N° 2	Samedi	637	40	47	7
Semaine N° 2	Samedi	638	42	43	1
Semaine N° 2	Samedi	639	40	42	2

Semaine N° 2	Samedi	640	40	45	5
Semaine N° 2	Samedi	641	45	48	3
Semaine N° 2	Samedi	642	48	52	4
Semaine N° 2	Samedi	643	53	58	5
Semaine N° 2	Samedi	644	59	60	1
Semaine N° 2	Samedi	645	66	67	1
Semaine N° 2	Samedi	646	67	69	2
Semaine N° 2	Samedi	647	73	78	5
Semaine N° 2	Samedi	648	74	73	-1
Semaine N° 2	Samedi	649	76	75	-1
Semaine N° 2	Samedi	650	74	74	0
Semaine N° 2	Samedi	651	74	74	0
Semaine N° 2	Samedi	652	74	75	1
Semaine N° 2	Samedi	653	74	75	1
Semaine N° 2	Samedi	654	77	77	0
Semaine N° 2	Samedi	655	77	77	0
Semaine N° 2	Samedi	656	75	76	1
Semaine N° 2	Samedi	657	76	80	4
Semaine N° 2	Samedi	658	77	79	2
Semaine N° 2	Samedi	659	73	78	5
Semaine N° 2	Samedi	660	72	76	4
Semaine N° 2	Samedi	661	69	73	4
Semaine N° 2	Samedi	662	66	70	4
Semaine N° 2	Samedi	663	64	70	6
Semaine N° 2	Samedi	664	65	71	6
Semaine N° 2	Samedi	665	67	68	1
Semaine N° 2	Samedi	666	65	66	1
Semaine N° 2	Samedi	667	63	63	0
Semaine N° 2	Samedi	668	62	66	4
Semaine N° 2	Samedi	669	61	62	1
Semaine N° 2	Samedi	670	60	59	-1
Semaine N° 2	Samedi	671	61	59	-2
Semaine N° 2	Samedi	672	59	57	-2

Tableau-A VI.6 : Comparaison de l'offre et de la demande par le test 3
(Samedi de la Semaine N° 1)

Semaine	Jour	Id demi-heure	Demande	Offre	Écart
Semaine N° 1	Samedi	289	53	55	2
Semaine N° 1	Samedi	290	51	51	0
Semaine N° 1	Samedi	291	48	49	1
Semaine N° 1	Samedi	292	48	48	0
Semaine N° 1	Samedi	293	41	47	6
Semaine N° 1	Samedi	294	42	47	5
Semaine N° 1	Samedi	295	43	46	3
Semaine N° 1	Samedi	296	43	50	7
Semaine N° 1	Samedi	297	44	50	6
Semaine N° 1	Samedi	298	41	44	3
Semaine N° 1	Samedi	299	40	42	2
Semaine N° 1	Samedi	300	40	43	3
Semaine N° 1	Samedi	301	40	44	4
Semaine N° 1	Samedi	302	42	43	1
Semaine N° 1	Samedi	303	40	41	1
Semaine N° 1	Samedi	304	40	42	2
Semaine N° 1	Samedi	305	45	46	1
Semaine N° 1	Samedi	306	48	50	2
Semaine N° 1	Samedi	307	53	54	1
Semaine N° 1	Samedi	308	59	58	-1
Semaine N° 1	Samedi	309	66	67	1
Semaine N° 1	Samedi	310	67	69	2
Semaine N° 1	Samedi	311	73	76	3
Semaine N° 1	Samedi	312	74	72	-2
Semaine N° 1	Samedi	313	76	74	-2
Semaine N° 1	Samedi	314	74	73	-1
Semaine N° 1	Samedi	315	74	72	-2
Semaine N° 1	Samedi	316	74	73	-1
Semaine N° 1	Samedi	317	74	75	1
Semaine N° 1	Samedi	318	77	76	-1
Semaine N° 1	Samedi	319	77	77	0
Semaine N° 1	Samedi	320	75	75	0

Semaine N° 1	Samedi	321	76	78	2
Semaine N° 1	Samedi	322	77	80	3
Semaine N° 1	Samedi	323	73	78	5
Semaine N° 1	Samedi	324	72	76	4
Semaine N° 1	Samedi	325	69	76	7
Semaine N° 1	Samedi	326	66	71	5
Semaine N° 1	Samedi	327	64	69	5
Semaine N° 1	Samedi	328	65	74	9
Semaine N° 1	Samedi	329	67	69	2
Semaine N° 1	Samedi	330	65	65	0
Semaine N° 1	Samedi	331	63	65	2
Semaine N° 1	Samedi	332	62	65	3
Semaine N° 1	Samedi	333	61	62	1
Semaine N° 1	Samedi	334	60	60	0
Semaine N° 1	Samedi	335	61	59	-2
Semaine N° 1	Samedi	336	59	57	-2

Qualité de la gestion de la flotte de véhicules

Le nombre de véhicules disponibles est principalement un problème en période de pointe. Ces périodes de pointe se rencontrent généralement en début d'après-midi, là où plusieurs quarts ayant commencé le matin finissent et plusieurs autres quarts débutent. Pourvoir éliminer tous les quarts débutant entre 12:00 et 13:00 inclusivement nous permet ainsi de gérer avec précision les flux de véhicules de façon à ne pas nécessiter de véhicules supplémentaires. Notre système peut donc procurer des économies substantielles à ce niveau étant donné le coût que représente l'ajout de plusieurs véhicules à la flotte.

Qualité des horaires individuels

Le système d'optimisation confectionne des horaires de bonne qualité selon les standards de la Corporation d'Urgences-santé, le Tableau-A VI.8 et les statistiques présentées dans le Tableau-A VI.7 montrent les caractéristiques de ces horaires. En effet, les horaires de la banque de patrons d'horaires sont construits de façon à concevoir des horaires qui sont certains d'être acceptés aussi bien par le patronat que par le syndicat. Un avantage de notre

système est qu'il permet facilement la limitation des heures possibles de début de quarts, empêchant ainsi des quarts à débiter à des heures indésirables, ce qui est utile ergonomiquement. L'utilisation d'un tel critère cause évidemment une forte rigidité dans la structure des horaires. Toutefois, cette rigidité est compensée en partie par l'utilisation des différentes durées de quarts de travail telle que présentée dans le Tableau-A VI.8, soit 8 heures, 10 heures et 12 heures, ce qui permet une répartition plus facile des heures de travail sur l'horizon. Il faut toutefois noter que de longs quarts de travail ne sont pas nécessairement souhaitables par certains employés à cause de la nature physiquement exigeante du travail, bien qu'ils soient opérationnellement plus avantageux.

Tableau-A VI.7 : Caractéristiques des horaires (Modèle)

	Test 1	Test 2	Test 3
Nombre maximum d'arrivées simultanées de véhicules	31	34	36
Pourcentage du respect des préférences de quart de travail	-	81.32%	100 %
Pourcentage des quarts débutants moins de 12h ou 16 h après le quart précédent	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Pourcentage des quarts débutants ou finissants entre 2 h et 6 h	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Pourcentage des quarts débutants entre 11 h et 14 h	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Pourcentage des quarts débutants à plus de 1 h de la médiane du quart	0.00 %	0.00 %	0.00 %

Tableau-A VI.8 : Distribution des horaires pour les 3 tests

Type d'horaire	Test 1	Test 2	Test 3
<u>6</u> 14 / 10 h	20	20	20
<u>7</u> 14 / 12 h	205	202	206
<u>8</u> 14 / 10 h	13	10	10
<u>10</u> 14 / 8 h	60	66	62

Cette annexe présente les variables utilisés, les résultats des tests effectués et les mesures pour valider notre modèle d'optimisation des horaires de T.A. Les résultats obtenus montrent la rapidité et la robustesse de notre modèle d'optimisation pour la confection des horaires des techniciens ambulanciers tout en respectant les contraintes et les standards définis par la Corporation d'Urgences-santé.

ANNEXE V

RÉSULTATS DES TESTS (ARCHITECTURE MULTI-AGENT)

L'analyse des résultats de nos tests permet de valider l'architecture et le principe de mise en œuvre de la méthode globale et intégrée proposée. L'objectif de ces tests consiste à minimiser la somme des coûts associés aux horaires ainsi que la somme des coûts associés à la gestion de la flotte de véhicules. Le problème à résoudre est la planification des horaires des techniciens ambulanciers (T.A). Ces employés sont groupés par paires sur chaque véhicule. Les deux T.A groupés ensemble ont donc exactement le même horaire pour la durée complète d'un certain quart. De plus, la planification des horaires doit se faire en prenant implicitement en compte la gestion des véhicules et la répartition par secteur. En effet, celle-ci contraint de façon importante la résolution du problème. Le lien fondamental entre les T.A et les véhicules est le suivant : les paires des T.A sont toujours affectées à un véhicule. Le problème à résoudre devient donc un problème de planification de paires de T.A qui préfèrent généralement conserver le même partenaire de travail.

Le respect de la demande cible est la contrainte souple la plus importante. Celui-ci doit avoir la priorité sur le respect de toutes les autres contraintes. La principale difficulté lors de la calibration de cette contrainte et de pénaliser les violations suffisamment pour donner priorité au respect de cette contrainte. Elle contraint l'offre à être supérieure ou égale à la demande pour toutes les périodes de l'horizon où c'est réalisable. Les types de quarts préférés doivent avoir des valeurs sensiblement du même ordre que celles des contraintes ergonomiques. Elles ne doivent pas avoir une importance trop grande puisqu'il est peu probable de trouver une solution dans laquelle chaque employé a tous les quarts qu'il désire. Étant donné que les contraintes préférentielles des types de quarts désirés peuvent entrer en conflit avec les contraintes ergonomiques, la différence de poids entre ces deux types de contraintes doit être calibrée en fonction du type de solution désirée. Les trois ont un horizon de 14 jours, 596 T.A, dont 40 à temps partiel et 556 à temps complet et un maximum de 123 véhicules. Le temps de calcul des tests effectués est présenté dans le Tableau-A V.2. Les tests intègrent la

répartition par secteur. Le temps varie de 24 à 42 minutes selon le nombre de variables et contraintes utilisées tel que expliqué dans l'Annexe IV.

Tableau-A V.1 : Temps de calcul des trois tests

	Test 1	Test 2	Test 3
Temps de calcul	00:23:12.84	00:25:31.23	00:41:27.18

Analyse des résultats

La planification des horaires des T.A est réalisée d'une manière itérative lorsque des changements de situation de travail se présentent, comme une forte variation de la demande de services par rapport aux prévisions (voir Figure-A V.1 et Tableau-A V.2). Ce changement est détecté par l'*Agent Interface* qui avise l'*Agent Superviseur* de la nouvelle situation. Afin de satisfaire aux nouvelles contraintes créées par ces modifications, la planification de base doit alors être entièrement révisée. Cela exige une analyse complète de la nouvelle situation de travail. L'*Agent Superviseur* envoie une requête à l'*Agent Planification*. Ce dernier communique avec l'*Agent de Demande* afin d'obtenir de nouvelles données prévisionnelles qui tiennent compte des nouvelles fluctuations. Cette nouvelle demande sert de base à la nouvelle planification. L'*Agent Planification* évalue plusieurs options possibles et les solutions retenues sont celles permettant de satisfaire le mieux les critères de qualité de service et les contraintes de gestion et logistiques (la meilleure solution est la moins coûteuse en terme de pénalités, de couverture de la demande et du nombre d'heures de travail). Cette solution est envoyée à l'*Agent Superviseur* qui la valide et la renvoie par la suite à l'*Agent Interface*. Si cette solution est jugée acceptable par l'utilisateur, les résultats seront enregistrés et les modifications seront effectuées. Sinon, l'utilisateur pourra lancer une nouvelle itération avec d'autres paramètres.

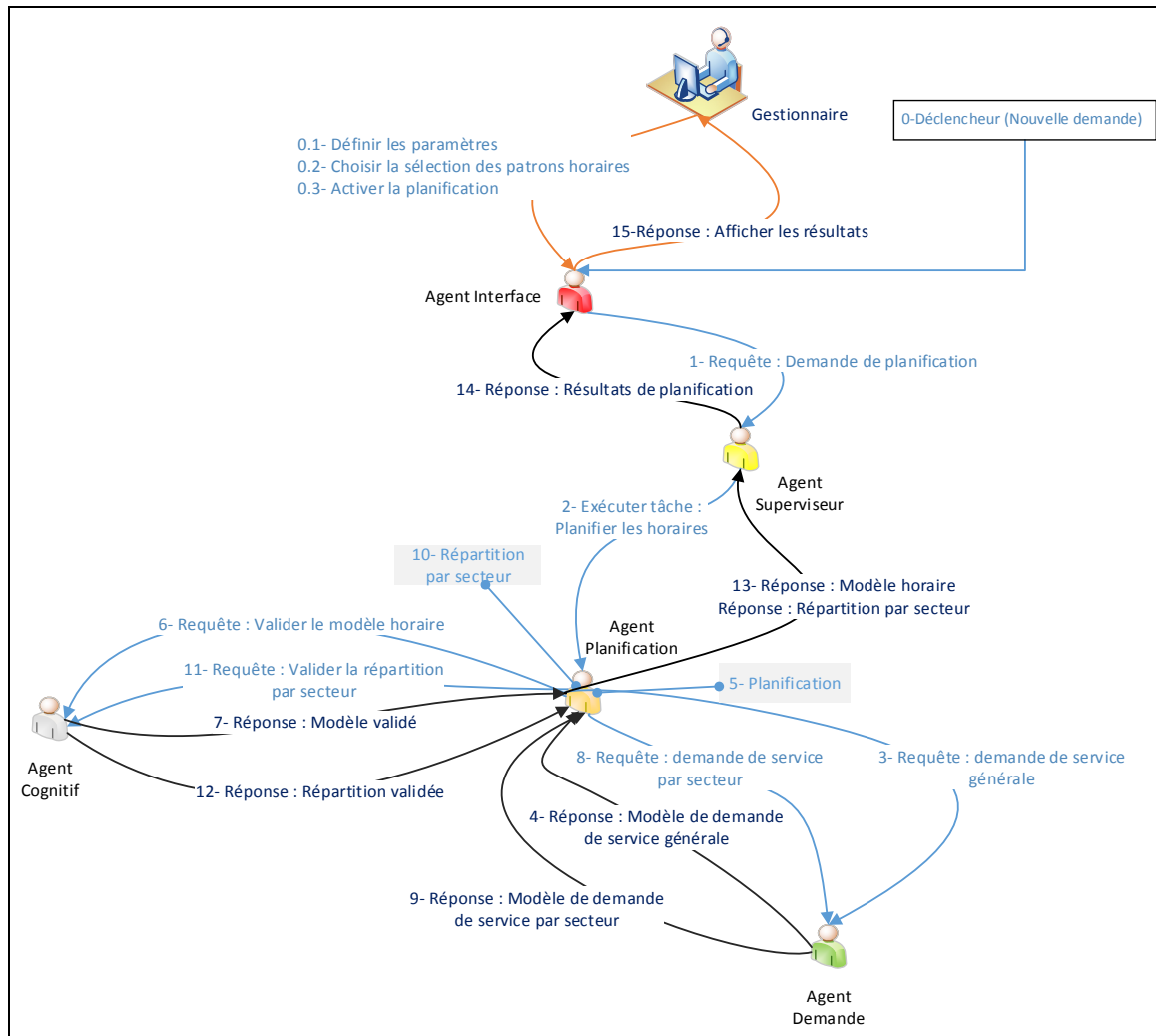


Figure-A V.1 : Interaction des agents pour une demande de planification

Tableau-A V.2 : Définition des actions et de l'interaction des agents pour le traitement d'une demande de planification des horaires

N°	Expéditeur	Destinataire	Action
0	Gestionnaire, déclencheur	Agent Interface	Message (ACL) : Activer la planification. Envoyer des données (SOAP).
1	Agent Interface	Agent Superviseur	Requête (ACL) : Demander la planification. Envoyer des données (SOAP).
2	Agent Superviseur	Agent Planification	Requête d'exécution de tâche (ACL) : Planifier les horaires. Envoyer des données (SOAP).

3	Agent Planification	Agent Demande	Requête (ACL) : Demander une modèle de demande de service générale. Envoyer des paramètres (SOAP).
4	Agent Demande	Agent Planification	Réponse (ACL) : Envoyer le modèle de demande. Envoyer des données (SOAP).
5	--	--	Exécuter la planification des horaires (Agent Planification). Enregistrer les résultats dans la base de données (SOAP).
6	Agent Planification	Agent Cognitif	Requête (ACL) : Demander la validation des résultats de la planification. Envoyer des données (SOAP).
7	Agent Cognitif	Agent Planification	Réponse (ACL) : Valider le modèle de planification des horaires.
8	Agent Planification	Agent Demande	Requête (ACL) : Demander un modèle de demande de service par secteur. Envoyer des paramètres (SOAP).
9	Agent Demande	Agent Planification	Réponse (ACL) : Envoyer le modèle de demande de service par secteur. Envoyer les données (SOAP).
10	--	--	Exécuter la répartition par secteur des horaires (Agent Planification). Enregistrer les résultats dans la base de données (SOAP).
11	Agent Planification	Agent Cognitif	Requête (ACL) : Demander la validation des résultats de la répartition par secteur. Envoyer des données (SOAP).
12	Agent	Agent	Réponse (ACL) : Valider le modèle de

	Cognitif	Planification	répartition par secteur.
13	Agent Planification	Agent Superviseur	Réponse (ACL) : Envoyer les résultats de la planification des horaires (Modèle de base) Réponse (ACL) : Envoyer les résultats de la répartition par secteur des horaires (Modèle par secteur) Envoyer les données (SOAP)
14	Agent superviseur	Agent Interface	Réponse (ACL) : Envoyer les résultats de planification des horaires et de la répartition par secteur. Envoyer les données (SOAP)
15	Agent Interface	Gestionnaire	Choisir le type de rapport à utiliser. Afficher les résultats.

Rappelons que la méthode d'estimation de la demande utilisée dans nos tests permet la couverture de 85 % de la demande réelle. Ainsi, l'offre par secteur (solution) présentée dans le Tableau-A V.3, Tableau-A V.4 et Tableau-A V.5 couvre 100 % (chaque ligne de l'offre est toujours supérieure ou égale à celle de la demande) et plus de demande estimée afin de maintenir le niveau de couverture réelle à 85 %. Par conséquent, lors de la planification du modèle horaire global, le nombre de véhicules disponibles tend toujours à surpasser la demande. Tout au long de ce processus de planification, certains paramètres limites sont vérifiés, comme le nombre maximal de véhicules pouvant débuter et finir leur quart à l'intérieur d'une même plage horaire et le maximum de T.A pouvant être en pauses-repas au même moment. Ceci permet d'éviter les embouteillages lors des entrées et des sorties aux centres opérationnels et assure une qualité de service constante. L'architecture proposée permet de respecter le nombre de véhicules disponibles sur tout l'horizon de solution.

L'approche de résolution adoptée par les agents de notre architecture scinde en trois étapes distinctes la planification des ressources humaines et matérielles des services préhospitaliers d'urgence, soit la détection du problème de planification, la sélection des patrons à utiliser et la couverture de la demande grâce à ces patrons. Nous fixons tout d'abord un groupe limité

de patrons répondant à certaines contraintes de base, comme par exemple aucune fin de semaine brisée. Ces contraintes de base sont ainsi traitées comme des contraintes dures devant absolument être respectées. À partir du groupe limité de patrons obtenus, l'*Agent Planification* doit ensuite satisfaire la demande tout en respectant le nombre de véhicules et de T.A disponibles. En limitant le nombre de patrons utilisés, le problème devient beaucoup moins complexe à solutionner, ce qui réduit les délais d'optimisation de la confection. Toutefois, l'imposition des patrons prédéterminés est une technique qui réduit le choix des contraintes souples en fixant plusieurs contraintes comme étant dures au départ.

Avant de débiter l'optimisation de la confection et de planification, l'estimation de la demande doit être réalisée par l'*Agent Demande* ainsi que l'établissement des paramètres de base par l'*Agent Interface*. De plus, parmi les paramètres devant être définis à l'avance, nous retrouvons le nombre maximal de véhicules disponibles (calculé par l'*Agent Véhicule*), les types de quarts pouvant être utilisés et le nombre de fins de semaines de congé par période de travail (définis par l'*Agent Cognitif*). Avant d'exécuter le module d'optimisation (de l'*Agent Planification*), divers paramètres doivent être fournis par l'utilisateur. Ceux-ci représentent les contraintes souples du problème. Parmi ces paramètres, nous trouvons la quantité minimale et maximale désirée de chaque type de patron et de chaque type de quarts, le nombre maximum de quarts pouvant débiter à chaque heure de la journée, le coût d'ajout d'un véhicule, *etc.*

Une fois l'ensemble de ces informations spécifiées, l'objectif de l'*Agent Planification* est de minimiser la somme pondérée de plusieurs fonctions de pénalités. Ces fonctions de pénalité sont liées au non-respect de chaque contrainte souple sous-jacente au problème. Si une contrainte est respectée, la fonction de pénalité associée prend une valeur de 0 et plus une contrainte est violée, plus la valeur de la fonction de pénalité augmente. Les contraintes utilisées pour les tests effectués concernent les aspects suivants :

- Couverture de la demande.
- Nombre d'horaires à temps partiel.
- Nombre de véhicules.

- Type de journée.
- Type de cycles.
- Nombre de cycles.
- Types de patrons d'horaires (horaires : combinaison d'un type de cycle et d'un type de journée. Exemple : cycle de 10 jours de travail sur 14 avec 8 heures de travail par jour).
- Nombre de patrons horaires.
- Groupements de patrons horaires.
- Groupement des départs.
- Équilibre entre les semaines (Un équilibre des jours et des heures travaillés pour chaque semaine).

Suite à l'exécution du module de planification, l'*Agent Planification* envoie un message à l'*Agent Superviseur* et enregistre les résultats obtenus dans la base de données SQL Server. Ces résultats peuvent ensuite envoyés (SOAP) ou être consultés grâce à différents rapports (voir Figure-A V.2), présentant les horaires, le nombre de véhicules nécessaires ainsi que la couverture de la demande. D'ailleurs, la satisfaction de la demande est le point critique de cette opération. Ainsi, à ce stade, des ajustements manuels peuvent être apportés aux horaires par l'utilisateur via l'*Agent Interface* de façon à corriger certaines faiblesses des résultats. Des requêtes de l'*Agent Interface* permettent de visualiser les déséquilibres créés, s'il y a lieu, par ces ajustements.

Secteur	Combinaison		Début	Fin	Nombre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Pause		
S1 - Centre Nord	814 - 10h	De	05:00:00	À 15:00:00	1				M	J				D	L	M			V	S	08:30:00	
S1 - Centre Nord	714 - 12h	De	05:00:00	À 17:00:00	1			L	M			V	S	D			M	J			09:30:00	
S3 - Est	1014 - 08h	De	05:00:00	À 13:00:00	1			L	M	M		V	S	D		M	M	J	V		09:00:00	
S5 - Centre Sud	814 - 10h	De	05:00:00	À 15:00:00	1	D				M	J				D	L	M			V	S	08:30:00
S1 - Centre Nord	714 - 12h	De	05:30:00	À 17:30:00	1			L	M			V	S	D			M	J			10:00:00	
S2 - Nord	714 - 12h	De	05:30:00	À 17:30:00	1			L	M			V	S	D			M	J			10:00:00	
S2 - Nord	714 - 12h	De	05:30:00	À 17:30:00	1			L	M			V	S	D			M	J			10:30:00	
S3 - Est	714 - 12h	De	05:30:00	À 17:30:00	1			L	M			V	S	D			M	J			10:00:00	
S4 - Ouest	714 - 12h	De	05:30:00	À 17:30:00	1			L	M			V	S	D			M	J			10:00:00	
S5 - Centre Sud	714 - 12h	De	05:30:00	À 17:30:00	4	D				M	J					L	M			V	S	10:00:00
S1 - Centre Nord	1014 - 08h	De	06:00:00	À 14:00:00	1			L	M	M	J	V				L	M	M	J	V		08:30:00
S1 - Centre Nord	1014 - 08h	De	06:00:00	À 14:00:00	1			L	M	M	J	V				L	M	M	J	V		09:00:00
S2 - Nord	1014 - 08h	De	06:00:00	À 14:00:00	1			L	M	M	J	V				L	M	M	J	V		08:30:00
S5 - Centre Sud	1014 - 08h	De	06:00:00	À 14:00:00	1	D			M	M	J	V				L		M	J	V	S	08:30:00
S1 - Centre Nord	1014 - 08h	De	06:30:00	À 14:30:00	1	D		L	M	M	J	V				L	M	M	J	V	S	10:30:00
S1 - Centre Nord	714 - 12h	De	06:30:00	À 18:30:00	3			L	M			V	S	D			M	J			12:00:00	
S1 - Centre Nord	714 - 12h	De	06:30:00	À 18:30:00	3	D				M	J					L	M			V	S	12:00:00
S1 - Centre Nord	714 - 12h	De	06:30:00	À 18:30:00	1	D				M	J					L	M			V	S	12:30:00
S2 - Nord	1014 - 08h	De	06:30:00	À 14:30:00	1			L	M	M	J	V				L	M	M	J	V		09:00:00
S2 - Nord	714 - 12h	De	06:30:00	À 18:30:00	1	D				M	J					L	M			V	S	12:00:00
S2 - Nord	714 - 12h	De	06:30:00	À 18:30:00	1	D				M	J					L	M			V	S	12:30:00
S3 - Est	714 - 12h	De	06:30:00	À 18:30:00	1			L	M			V	S	D			M	J			12:00:00	
S4 - Ouest	714 - 12h	De	06:30:00	À 18:30:00	1			L	M			V	S	D			M	J			12:00:00	
S5 - Centre Sud	1014 - 08h	De	06:30:00	À 14:30:00	1			L	M	M	J	V				L	M	M	J	V		09:00:00
S5 - Centre Sud	1014 - 08h	De	06:30:00	À 14:30:00	1			L	M	M	J	V				L	M	M	J	V		10:00:00
S5 - Centre Sud	714 - 12h	De	06:30:00	À 18:30:00	1			L	M			V	S	D			M	J			12:00:00	
S1 - Centre Nord	1014 - 08h	De	07:00:00	À 15:00:00	1	D		L	M	M	J	V				L	M	M	J	V	S	10:00:00
S1 - Centre Nord	1014 - 08h	De	07:00:00	À 15:00:00	1			L	M	M	J	V				L	M	M	J	V		11:00:00
S1 - Centre Nord	714 - 12h	De	07:00:00	À 19:00:00	1	D				M	J					L	M			V	S	12:00:00
S2 - Nord	1014 - 08h	De	07:00:00	À 15:00:00	1			L	M	M		V	S	D		L	M	J	V		09:30:00	
S2 - Nord	1014 - 08h	De	07:00:00	À 15:00:00	1			L	M	M	J			V	S	D	L	M	M	V		10:30:00
S3 - Est	1014 - 08h	De	07:00:00	À 15:00:00	1	D		L	M	M	J	V				L	M	M	J	V	S	10:00:00
S5 - Centre Sud	1014 - 08h	De	07:00:00	À 15:00:00	1			L	M			J	V	S	D		M	M	J	V		11:00:00
S1 - Centre Nord	1014 - 08h	De	07:30:00	À 15:30:00	1			L	M	M	J	V				L	M	M	J	V		11:30:00

Figure-A V.2 : Exemple de rapport de répartition par secteur

En somme, le processus de planification permet de créer une solution qui couvre le mieux possible la demande estimée. Si le résultat obtenu n'est pas satisfaisant, l'*Agent Superviseur* ou l'utilisateur via l'*Agent Interface* peut reprendre cette opération afin d'optimiser la planification globale avec un groupe de patrons différents. Ces opérations peuvent être itératives et nécessitent la génération de plusieurs versions de modèles d'horaires à comparer.

Les résultats obtenus par nos tests permettent de constater que l'offre est toujours plus élevée que la demande ce qui permet une bonne couverture de cette demande. De plus, le nombre de véhicules nécessaires est presque constamment équivalent à la demande estimée. Afin de mieux saisir la signification des résultats dans les graphiques du Tableau-A V.3, du Tableau-

A V.4 et du Tableau-A V.5, nous avons sommé l'offre pour faire ressortir les écarts entre celles-ci. La borne inférieure relative à la couverture de la demande se situe environ à 100,6 % de la demande estimée. L'offre générée par l'architecture multi-agents surpasse cette borne de 8 %. En fait, la couverture de la demande peut perdre jusqu'à 8 % d'efficience lors de la planification des horaires et conserver une offre plus près de la demande. En convertissant ces résultats en nombre d'ambulanciers heure par année, nous pouvons obtenir une idée approximative des coûts supplémentaires d'exploitation générés par le dépassement de la demande. Bien entendu, les résultats obtenus restent des bornes inférieures, mais permettent de juger des économies maximales théoriques pouvant être réalisées.

Outre l'analyse de la couverture de la demande, il est possible de comparer les types de quarts utilisés pour couvrir la demande. Ceci nous permet de faire ressortir certains facteurs responsables de l'écart entre l'offre et la demande. La maximisation du nombre de quarts de 10 heures et 12 heures permet d'offrir une meilleure couverture de la demande avec un nombre total de quarts moins élevé. La couverture de la demande obtenue dans les tests peut être améliorée en allongeant la durée des quarts utilisés.

Le Tableau-A V.3, le Tableau-A V.4 et le Tableau-A V.5 présentent les données d'offre et la demande de service pour toutes les périodes de planification concernant le secteur 1 pour la journée du Mardi de la Semaine N° 1. La période de planification est définie sur 14 jours, soit 672 demi-heures commençant le Dimanche. La journée du mardi (Semaine N° 1) a 48 demi-heures de travail commençant à l'Id demi-heure 97. L'Id demi-heure 144 représente la dernière demi-heure de travail du Mardi de la Semaine N°1. La cinquième colonne représente la demande de service pour une demi-heure, la sixième colonne représente l'offre de service (le résultat de notre modèle d'optimisation) pour une demi-heure et la septième colonne représente l'écart entre l'offre et la demande. Cet écart est positif à 100 % des cas pour le test 1, 95.83 % des cas pour le test 2 et 80.83 % des cas pour le test 3 permettant une bonne couverture de la demande de service.

Tableau-A V.3 : Comparaison de l'offre et de la demande par le test 1

(Mardi de la Semaine N° 1 pour le secteur 1)

Semaine	Secteur	Jour	Id demi-heure	Demande	Offre	Écart
Semaine N° 1	1	Mardi	97	8	12	4
Semaine N° 1	1	Mardi	98	8	12	4
Semaine N° 1	1	Mardi	99	7	11	4
Semaine N° 1	1	Mardi	100	8	10	2
Semaine N° 1	1	Mardi	101	7	11	4
Semaine N° 1	1	Mardi	102	6	11	5
Semaine N° 1	1	Mardi	103	5	11	6
Semaine N° 1	1	Mardi	104	5	11	6
Semaine N° 1	1	Mardi	105	7	11	4
Semaine N° 1	1	Mardi	106	5	10	5
Semaine N° 1	1	Mardi	107	6	7	1
Semaine N° 1	1	Mardi	108	5	8	3
Semaine N° 1	1	Mardi	109	6	11	5
Semaine N° 1	1	Mardi	110	7	10	3
Semaine N° 1	1	Mardi	111	8	12	4
Semaine N° 1	1	Mardi	112	8	12	4
Semaine N° 1	1	Mardi	113	11	14	3
Semaine N° 1	1	Mardi	114	12	15	3
Semaine N° 1	1	Mardi	115	15	17	2
Semaine N° 1	1	Mardi	116	15	19	4
Semaine N° 1	1	Mardi	117	17	22	5
Semaine N° 1	1	Mardi	118	17	23	6
Semaine N° 1	1	Mardi	119	18	25	7
Semaine N° 1	1	Mardi	120	18	24	6
Semaine N° 1	1	Mardi	121	15	27	12
Semaine N° 1	1	Mardi	122	16	26	10
Semaine N° 1	1	Mardi	123	16	27	11
Semaine N° 1	1	Mardi	124	15	28	13
Semaine N° 1	1	Mardi	125	17	29	12
Semaine N° 1	1	Mardi	126	17	27	10
Semaine N° 1	1	Mardi	127	15	25	10
Semaine N° 1	1	Mardi	128	17	24	7

Semaine N° 1	1	Mardi	129	15	25	10
Semaine N° 1	1	Mardi	130	17	25	8
Semaine N° 1	1	Mardi	131	14	24	10
Semaine N° 1	1	Mardi	132	14	22	8
Semaine N° 1	1	Mardi	133	14	23	9
Semaine N° 1	1	Mardi	134	11	22	11
Semaine N° 1	1	Mardi	135	13	21	8
Semaine N° 1	1	Mardi	136	13	23	10
Semaine N° 1	1	Mardi	137	11	20	9
Semaine N° 1	1	Mardi	138	11	20	9
Semaine N° 1	1	Mardi	139	11	20	9
Semaine N° 1	1	Mardi	140	10	19	9
Semaine N° 1	1	Mardi	141	11	19	8
Semaine N° 1	1	Mardi	142	10	18	8
Semaine N° 1	1	Mardi	143	11	18	7
Semaine N° 1	1	Mardi	144	8	14	6

Tableau-A V.4 : Comparaison de l'offre et de la demande par le test 2

(Mardi de la Semaine N° 1 pour le secteur 1)

Semaine	Secteur	Jour	Id demi-heure	Demande	Offre	Écart
Semaine N° 1	1	Mardi	97	8	10	2
Semaine N° 1	1	Mardi	98	8	9	1
Semaine N° 1	1	Mardi	99	7	9	2
Semaine N° 1	1	Mardi	100	8	10	2
Semaine N° 1	1	Mardi	101	7	9	2
Semaine N° 1	1	Mardi	102	6	7	1
Semaine N° 1	1	Mardi	103	5	7	2
Semaine N° 1	1	Mardi	104	5	8	3
Semaine N° 1	1	Mardi	105	7	9	2
Semaine N° 1	1	Mardi	106	5	6	1
Semaine N° 1	1	Mardi	107	6	6	0
Semaine N° 1	1	Mardi	108	5	7	2
Semaine N° 1	1	Mardi	109	6	9	3
Semaine N° 1	1	Mardi	110	7	10	3
Semaine N° 1	1	Mardi	111	8	9	1

Semaine N° 1	1	Mardi	112	8	12	4
Semaine N° 1	1	Mardi	113	11	13	2
Semaine N° 1	1	Mardi	114	12	16	4
Semaine N° 1	1	Mardi	115	15	18	3
Semaine N° 1	1	Mardi	116	15	19	4
Semaine N° 1	1	Mardi	117	17	20	3
Semaine N° 1	1	Mardi	118	17	20	3
Semaine N° 1	1	Mardi	119	18	20	2
Semaine N° 1	1	Mardi	120	18	19	1
Semaine N° 1	1	Mardi	121	15	18	3
Semaine N° 1	1	Mardi	122	16	18	2
Semaine N° 1	1	Mardi	123	16	18	2
Semaine N° 1	1	Mardi	124	15	19	4
Semaine N° 1	1	Mardi	125	17	19	2
Semaine N° 1	1	Mardi	126	17	19	2
Semaine N° 1	1	Mardi	127	15	19	4
Semaine N° 1	1	Mardi	128	17	19	2
Semaine N° 1	1	Mardi	129	15	16	1
Semaine N° 1	1	Mardi	130	17	17	0
Semaine N° 1	1	Mardi	131	14	18	4
Semaine N° 1	1	Mardi	132	14	17	3
Semaine N° 1	1	Mardi	133	14	16	2
Semaine N° 1	1	Mardi	134	11	13	2
Semaine N° 1	1	Mardi	135	13	14	1
Semaine N° 1	1	Mardi	136	13	13	0
Semaine N° 1	1	Mardi	137	11	12	1
Semaine N° 1	1	Mardi	138	11	12	1
Semaine N° 1	1	Mardi	139	11	9	-2
Semaine N° 1	1	Mardi	140	10	8	-2
Semaine N° 1	1	Mardi	141	11	11	0
Semaine N° 1	1	Mardi	142	10	12	2
Semaine N° 1	1	Mardi	143	11	12	1
Semaine N° 1	1	Mardi	144	8	11	3

Tableau-A V.5 : Comparaison de l'offre et de la demande par le test 3

(Mardi de la Semaine N° 1 pour le secteur 1)

Semaine	Secteur	Jour	Id demi-heure	Demande	Offre	Écart
Semaine N° 1	1	Mardi	97	8	7	-1
Semaine N° 1	1	Mardi	98	8	7	-1
Semaine N° 1	1	Mardi	99	7	7	0
Semaine N° 1	1	Mardi	100	8	6	-2
Semaine N° 1	1	Mardi	101	7	6	-1
Semaine N° 1	1	Mardi	102	6	6	0
Semaine N° 1	1	Mardi	103	5	5	0
Semaine N° 1	1	Mardi	104	5	6	1
Semaine N° 1	1	Mardi	105	7	6	-1
Semaine N° 1	1	Mardi	106	5	6	1
Semaine N° 1	1	Mardi	107	6	5	-1
Semaine N° 1	1	Mardi	108	5	6	1
Semaine N° 1	1	Mardi	109	6	8	2
Semaine N° 1	1	Mardi	110	7	8	1
Semaine N° 1	1	Mardi	111	8	10	2
Semaine N° 1	1	Mardi	112	8	12	4
Semaine N° 1	1	Mardi	113	11	13	2
Semaine N° 1	1	Mardi	114	12	14	2
Semaine N° 1	1	Mardi	115	15	15	0
Semaine N° 1	1	Mardi	116	15	16	1
Semaine N° 1	1	Mardi	117	17	15	-2
Semaine N° 1	1	Mardi	118	17	15	-2
Semaine N° 1	1	Mardi	119	18	16	-2
Semaine N° 1	1	Mardi	120	18	15	-3
Semaine N° 1	1	Mardi	121	15	18	3
Semaine N° 1	1	Mardi	122	16	17	1
Semaine N° 1	1	Mardi	123	16	19	3
Semaine N° 1	1	Mardi	124	15	15	0
Semaine N° 1	1	Mardi	125	17	15	-2
Semaine N° 1	1	Mardi	126	17	17	0
Semaine N° 1	1	Mardi	127	15	16	1
Semaine N° 1	1	Mardi	128	17	16	-1

Semaine N° 1	1	Mardi	129	15	16	1
Semaine N° 1	1	Mardi	130	17	16	-1
Semaine N° 1	1	Mardi	131	14	15	1
Semaine N° 1	1	Mardi	132	14	14	0
Semaine N° 1	1	Mardi	133	14	15	1
Semaine N° 1	1	Mardi	134	11	12	1
Semaine N° 1	1	Mardi	135	13	12	-1
Semaine N° 1	1	Mardi	136	13	14	1
Semaine N° 1	1	Mardi	137	11	11	0
Semaine N° 1	1	Mardi	138	11	11	0
Semaine N° 1	1	Mardi	139	11	12	1
Semaine N° 1	1	Mardi	140	10	11	1
Semaine N° 1	1	Mardi	141	11	10	-1
Semaine N° 1	1	Mardi	142	10	10	0
Semaine N° 1	1	Mardi	143	11	11	0
Semaine N° 1	1	Mardi	144	8	11	3

Dans cette annexe, nous avons montré les résultats et le fonctionnement de notre architecture multi-agents d'optimisation de la planification des services préhospitaliers d'urgence. Nous avons présenté une présentation du processus de traitement et effectué une analyse des résultats obtenus qui montrent la robustesse du modèle proposé en temps de calcul et de résolution, en couverture de la demande de service et de la qualité des horaires selon les standards de la Corporation d'Urgences-santé. Cette architecture permet d'aider le planificateur à proposer des solutions fiables et cohérentes.

BIBLIOGRAPHIE

- Alba E. et G. Leguizamón. 2013. "Ant Colony Based Algorithms for Dynamic Optimization Problems". Springer Berlin Heidelberg, Studies in Computational Intelligence Volume 433, 189-210.
- Alexiadis Anastasios et Ioannis Refanidis. 2013. "Generating Alternative Plans for Scheduling Personal Activities", Proceedings of SPARK 2013 (Scheduling and Planning Applications workshop), 35-40.
- Anagnostou, Anastasia, Nouman, Athar et Taylor, Simon JE (2013). "Distributed hybrid agent-based discrete event emergency medical services simulation". In: Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference: Simulation: Making Decisions in a Complex World. IEEE Press, 1625-1636.
- Awasthi, A., Jing Chen, Steven Shechter, Derek Atkins, Linda Lemke, Les Fisher et Peter Dodek. 2013. "Using Operations Research to Plan Improvement of the Transport of Critically Ill Patients", Informa healthcare, Prehospital Emergency Care, Vol. 17, No. 4, 466-474.
- Barrera, S., R., Gómez, G.R. et López-López, A. 2011. "Design patterns in multi-agent system simulation". Electrical Communications and Computers. IEEE, 60–65.
- Barth Thomas, Thomas Fielenbach, Mohamed Bourimi, Dogan Kesdogan et Pedro G. Villanueva. 2011. "Supporting Distributed Decision Making Using Secure Distributed User Interface", Human-Computer Interaction Series, Springer London, 177-184
- Baskaranc, R., T. Vengattaramana, S. Abiramy et P. Dhavachelvana. 2011. "An application perspective evaluation of multi-agent system in versatile environments". Elsevier, Expert Systems with Applications, Volume 38, Issue 3, 1405–1416.
- Bergha, Jorne Van den, Jeroen Beliëna, Philippe De Brueckera, Erik Demeulemeester et Liesje De Boeck. May 2013. "Personnel scheduling: A literature re-view". European Journal of Operational Research, Volume 226, Issue 3, 367–385.
- Bernon, C., Massimo Cossentino, Marie-Pierre Gleizes, Paola Turci et Franco Zambonelli. 2005. "A Study of Some Multi-agent Meta-models", Agent-Oriented Software Engineering V - Springer, Lecture Notes in Computer Science Volume 3382, 62-77.
- Billhardt, Holger, Lujak, Marin et Sanchez-Brunete, Vicente (2014). "Dynamic coordination of ambulances for emergency medical assistance services". Knowledge-Based Systems, vol. 70, 268-280.

- Brunner Jens O. et Raik Stolletz. June 2012 "Fair optimization of fortnightly physician schedules with flexible shifts". *European Journal of Operational Research*, Volume 219, Issue 3, 622–629.
- Burke, E., G. Lendall et E. Soubeiga. 2003. "A Tabu-Search Hyperheuristic for Timetabling and Rostering", *Journal of Heuristics - Boston*, 9(6):451-470.
- Buzon, Cantera. I.E. 2001. "La confection des horaires de travail des médecins d'urgence résolue à l'aide de la recherche avec tabous". Mémoire de M. Sc., École Polytechnique de Montréal.
- Cabreraa Eduardo, Manel Taboadab, Ma Luisa Iglesiasc, Francisco Epeldec et Emilio Luquea. 2011. "Optimization of Healthcare Emergency Departments by Agent-Based Simulation". *Computer Science - Elsevier*, Volume 4, 2011, *Proceedings of the International Conference on Computational Science, ICCS*, 1880–1889.
- Camps Valérie, Marie-Pierre Gleizes, Anthony Karageorgos et Giovanna Di Marzo Serugendo. 2011 "Agents and Multi-Agent Systems". *Natural Computing Series*, Springer Berlin Heidelberg, 105-119.
- Cardoso, Luciana, Fernando, Marins, Filipe, Portela, Manuel, Santos, António, Abelha et José, Machado. 2014. "A Multi-agent Platform for Hospital Interoperability". Springer International Publishing, *Ambient Intelligence - Software and Applications, Advances in Intelligent Systems and Computing*, Volume 291, 127-134.
- Carravilla, M. Antónia, Marta Rocha et José Fernando Oliveira. 2013. "Cyclic staff scheduling: optimization models for some real-life problems", *Journal of Scheduling (Springer)*, Volume 16, Issue 2, 231-242.
- Cheang, B., H. Li, A. Lim et B. Rodrigues. 2003. "Nurse rostering problems - A bibliographic survey". *European Journal of Operational Research - Amsterdam*, 151(3):447-460.
- Chennaoui, Adil et Marc Paquet (2014). "Multi-Agent Decision-Making Support Model for the Management of Prehospital Emergency Services." *International Journal of Machine Learning & Computing* vol. 4 no 2.
- Chu, Y., You, F. et Wassick, J. M. 2014. "Hybrid method integrating agent-based modeling and heuristic tree search for scheduling of complex batch processes". *Computers & Chemical Engineering (Elsevier)*, Volume 60, 277–296.
- Corral, Jorge et Daniel Calegari. 2011. "Towards an Agent-Based Methodology for Developing Agro-Ecosystem Simulations". *Software Engineering and Formal Methods*, Springer, *Lecture Notes in Computer Science*, Volume 7041, 431-446.
- Crawford, B., R. Soto, E. Monfroy, W. Palma et F. Paredes. 2013. "Nurse and Paramedic Rostering with Constraint Programming: A Case Study", *ROMANIAN JOURNAL*

OF INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY, Volume 16, Number 1, 52–64.

- Crowston, Kevin, James Howison, Carsten Osterlund et Francesco Bolici. 2012. "Stigmergy and Implicit Coordination in Software Development", CSCW'12, ACM.
- Daknou, A. 2011. « Architecture distribuée à base d'agents pour optimiser la prise en charge des patients dans les services d'urgence en milieu hospitalier ». Thèse de Doctorat, École Centrale de Lille, 63.
- Daknou, A., Zgaya H., Hammadi S. et Hubert H. 2008. "Toward a MultiAgent Model for the Care of Patients at The Emergency Department", MAMECTIS'08 - Proceedings of the 10th WSEAS international conference on Mathematical methods, Computational techniques and intelligent systems, Corfu, Greece, 264-269.
- Daly, John L. 2011. "Human Resource Management in the Public Sector: Policies and Practices", M. E. Sharpe.
- Dantzig, G.B. 2002. "Linear Programming", Operations Research - Linthicum, 50(1):42 48
- Dantzig, G.B. et P. Wolfe. 1960. "Decomposition Principle for Linear Programs". Operations research, 8:101-111.
- DeLoach S.A. et J.C. Garcia-Ojeda. 2010 "O-MaSE: a customisable approach to designing and building complex, adaptive multi-agent systems". International Journal of Agent-Oriented Software Engineering, Volume 4, Number 3, 244-280.
- DeLoach S.A. et M.F. Wood. 2001. "An Overview of the Multi-agent Systems Engineering Methodology", In Agent-Oriented Software Engineering – Proceedings of the First International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering, Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, Vol. 1957.
- DeLoach, S.A. 2005. "Engineering Organizationbased Multiagent Systems", The 4th International Workshop on Software Engineering for Largescale multiagent Systems - SELMAS'05, vol. 3914, 109–125.
- Demazeau, Y., M. Pěchouček, J. M. Corchado et J. B. Pérez. 2011. "Advances on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems", 9th International Conference on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems, Advances in Intelligent and Soft Computing - Springer, Volume 88.
- Denton, Timothy. 2014. "Rapport sur les questions ayant trait aux services d'urgence 9-1-1 ", Conseil de la radiodiffusion et des télécommunications canadiennes, 14.
- Desrosiers, J., Desaulniers, G., Y. Dumas, S. Marc, B. Rioux, M.M. Solomon et F. Soumis. 1997. "Crew pairing at Air France", European Journal of Operational Research - Amsterdam, 97(2):245 259.

- Dessalles Jean-Louis, Jean-Pierre Müller et Denis Phan. 2007. «Emergence in Multi-Agent Systems: Conceptual and Methodological Issues», in “Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences”, Oxford - The Bard-well Press, 327-356.
- Devendeville, L., A. A. Soukour, C. Lucet et A. Moukrim. 2013. “A memetic algorithm for staff scheduling in airport security service“. *Expert Systems With Applications*, 40(18):7504-7512.
- Dhavachelvan, P. Dhavachelvan et G. V. Uma. 2005. "Multi-agent based framework for intra-class testing of object-oriented software: Construction and analysis". *International Journal on Applied Soft Computing*, 5(2), 205–222.
- Dhavachelvan, P., G. V. Uma et V.S.K Venkatachalapathy. 2006. "A new approach in development of distributed framework for automated software testing using agents". *International Journal on Knowledge-Based Systems*, 19(4), 235–247.
- Dovgan E., Bostjan Kaluza, Violeta Mirchevska, Mitja Lustrek et Matjaz Gams. 2010. "An Agent-Based Approach to Care in Independent Living". Springer Berlin Heidelberg, *Ambient Intelligence, Lecture Notes in Computer Science*, Volume 6439, 177-186.
- Drogoul, A. 1993. « De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes : une étude de l'émergence de structure d'organisation dans les systèmes multi-agents ». Phd thesis. Université de Paris VI.
- Ernest, A.T., H. Jiang, M. Krishnamoorthy et D. Sier. 2004. “Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models”. *European Journal of Operational Research*, 153:3-27.
- Ernest, A.T., H. Jiang, M. Krishnamoorthy, B. Owens et D. Sier. 2004. “An Annotated Bibliography of Personnel Scheduling and Rostering”. *Annals of Operations Research - Basel*, 127(1:4):21-144.
- Ernest, A.T., P. Hourigan, M. Krishnamoorthy, G. Mills, H. Nott et D. Sier. 1999. “Rostering Ambulance Officers”. *Proceedings of the 15th National Conference of the Australian Society for Operations Research*, 470-481.
- Feng Yunqing, Xuemei Li et Ning Ma. 2012. "Research of Traffic Share in Different Models of Transport Based on the Agent Theory", *Joint Rail Conference 2012, ASME*, 813-822.
- Ferber, J. 1995. « Les systèmes multi-agents ». InterEditions, Paris.
- Gabdulkhakova, Aygul, Konik-Ries, B., et Rizvanov, Dmitry A (2011). “An agent-based solution to the resource allocation problem in emergency situations”. In: *Web Services (ECOWS), 2011 Ninth IEEE European Conference on*. IEEE, 151-157.

- Garcia-Magarino, Iván et Gutierrez, Celia (2013). "Agent-oriented modeling and development of a system for crisis management". *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no 16, 6580-6592.
- GC. 2014. "Loi sur les services préhospitaliers d'urgence". Chapitre S-6.2, Gouvernement du Québec.
- Gellat C.D. Jr., Kirckpatrick, S. et M.P. Vecchi. 1983. "Optimization by Simulated Annealing", *Science*, 220 (4598):671-680.
- Gendreau, M., Y. Kergosien, A. Ruiz et P. Soriano. 2014. "Managing a Fleet of Ambulances to Respond to Emergency and Transfer Patient Transportation Demands", *Proceedings of the International Conference on Health Care Systems Engineering, Springer Proceedings in Mathematics & Statistics Volume 61*, 303-315.
- Gendron B., Beaulieu, H., J. Ferland et P. Michelon. 2000. "A mathematical programming approach for scheduling physicians in the emergency room". *Health Care Management Science - Bussum*, 3(3):193 200.
- Gendron, Bernard, Marie-Claude Côté et L.M. Rousseau. 2013. "Grammar-Based Column Generation for Personalized Multi-Activity Shift Scheduling", *INFORMS Journal on Computing*, Volume 25 Issue 3, 461-474.
- Georgeff, M., A. Rao et D. Kinny. 1996. "A methodology and modeling technique for systems of BDI agents". *Agents Breaking Away : Proceedings of the Seventh European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World MAAMAW'96*.
- Glover, F. 1986. "Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence", *Computers and Operations Research*, 5:533-549.
- González-Vélez H., M. Mier, M. Julià-Sapé, T. N. Arvanitis, J. M. García-Gómez, M. Robles, P. H. Lewis, S. Dasmahapatra, D. Dupplaw, A. Peet, C. Arús, B. Celda, S. V. Huffel et M. Lluch-Ariet. 2009. "HealthAgents: distributed multi-agent brain tumor diagnosis and prognosis", *Springer US, Applied Intelligence*, Volume 30, Issue 3, 191-202.
- Goodwin, Graham. C. et Adrian. M. Mediolia. 2013. "Scenario-based, closed-loop model predictive control with application to emergency vehicle scheduling", *International Journal of Control*, Volume 86, Issue 8, 1338-1348.
- Grenier, C., Martin, V. 2013. « Performance des organisations et bien-être des usagers: Quels modes de pilotage et d'intervention ». *Management et Avenir*, Vol. 61, No. 3, 129-145.
- Groza, A., Marginean, A., et Iancu, B. (2014). "Towards Improving Situation Awareness during Emergency Transportation through Ambulance-2-X Communication and

- Semantic Stream Reasoning”. In: International Conference on Advancements of Medicine and Health Care through Technology; 5th–7th June 2014, Cluj-Napoca, Romania. Springer International Publishing, 97-100.
- Grunske, L., Aleti, A., Buhnova, B., Koziolk, A. et Meedeniya, I. 2012. "Software Architecture Optimization Methods: A Systematic Literature Review", Software Engineering, IEEE, Volume: 39, Issue: 5, 658-683.
- Guertin Y. 2012. «Improved schedules of paramedics and supervisors: preliminary description of requirements». Executive committee of prehospital services.
- Guertin Y., Blais M. et Morel C. 2012. «Paramedics schedules: Current situation», Statistics and operational research Service, Urgences-Santé de Québec.
- Güler M. Güray. September 2013. «A hierarchical goal programming model for scheduling the outpatient clinics», Expert Systems with Applications - Elsevier, Volume 40, Issue 12, 4906–4914.
- Hansen, P. 1986. "The steepest ascent mildest descent heuristic for combinatorial programming". Numerical Methods in Combinatorial Optimization Congress, Capri.
- HCC. 2013. "Rapport du sommet national sur les ressources humaines de la santé", <http://healthcouncilcanada.ca/fr/index.php>, Health Council Canadian.
- Holland, J.H. 1975. "Adaptation In Natural and Artificial Systems". University of Michigan Press - Ann Arbor.
- Ibri, Sarah, Nourelfath, Mustapha, et Drias, Habiba (2012). "A multi-agent approach for integrated emergency vehicle dispatching and covering problem". Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 25, no 3, 554-565.
- Isern David, David Sánchez et Antonio Moreno (2010). "Agents applied in health care: A review". International Journal of Medical Informatics, Elsevier, Volume 79, Issue 3, 145–166.
- ISQ. 2013. «Profils statistiques par région et MRC géographiques». <http://www.stat.gouv.qc.ca>. Institut de la statistique du Québec.
- J. E. Coster, J. E. Turner, N. Sirwardena, R. Wilson et V.-H. Phung. 2013 "Prioritising Outcome Measures for Ambulance Service Care: A Three Stage Consensus Study". Journal of Epidemiol Community Health. Suppl.1.
- John Krogstie. 2012. "Modeling of Digital Ecosystems: Challenges and Opportunities". 13th IFIP, Advances in Information and Communication Technology, Springer Berlin Heidelberg, Volume 380, 137-145.

- Karakatic, Sašo et Podgorelec, Vili (2015). "A survey of genetic algorithms for solving multi depot vehicle routing problem". *Applied Soft Computing*, vol. 27, 519-532.
- Kassa, B. A. et Tizazu A. E. 2013. "Personnel scheduling using an integer programming model- an application at Avanti Blue-Nile Hotels". *Springer Plus*, 2:333.
- Kohl, N. et S.E. Karish. 2004. "Airline Crew Rostering : Problem Types, Modeling, and Optimization". *Annals of Operations Research - Basel*, 127:223-257.
- Kruchten P. 2000. "The Rational Unified Process: An Introduction". 2nd Edition, Addison-Wesley Longman.
- Krzywicki D., L. Faber, A. Byrski et M. Kisiel-Dorohinicki. 2014. "Computing agents for decision support systems", Elsevier - Future Generation Computer Systems, Volume 37, 390–400.
- Labbé, S. 1998. "La confection automatisée d'horaires pour les médecins en salle d'urgence". Mémoire de M. Sc., École des Hautes Études Commerciales de Montréal.
- Lahlouhi A. 2001. « Méthodologie de développement d'environnements de développement de SMA ». *Techniques et sciences informatiques*, volume 1.
- Laichour, H. 2002. « Modélisation Multi-Agents et Aide à la Décision : Application à la régulation des correspondances dans les réseaux de transport urbains ». Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille.
- Laleci G. B., A. Dogac, M. Olduz, I. Tasyurt, M. Yuksel et A. Okcan. 2008. "SAPHIRE: A Multi-Agent System for Remote Healthcare Monitoring through Computerized Clinical Guidelines". Springer - Birkhäuser Basel, Whitestein Series in Software Agent Technologies and Autonomic Computing, 25-44.
- Land, A.H. et A.G. Doig. 1960. "An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems". *Econometrica*, 28: 497-520.
- Laura Climent, Richard J. Wallace, Miguel A. Salido et Federico Barber. 2013. "A Constraint Programming Approach to Solve Scheduling Problems under Uncertainty". 8th Workshop on Constraint Satisfaction Techniques for Planning and Scheduling Problems: COPLAS 2013, 28-35.
- LeBlanc V.R., Darling S., Russell McDonald et Aris Scott. 2008. "Effectiveness of Simulation-based Evaluations of Paramedic Performance". Canadian Patient Safety Institute.
- Leclercq G., J.M. Haegy, M. Andronikof, M-J. Thiel, J. Simon, M. Bichet-Beunaiche et A-M. Bouvier. 2003. « Éthique et urgences Réflexions et recommandations de la Société Francophone de Médecine d'Urgence ». *SMFU - Journal Européen des Urgences*, 1-14.

- Lin, S. 1965. "Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem", Bell System Technical Journal, 44:2245-2269.
- Liu, X.Q. et Xiao-yuan Wang. 2013. "An Adaptive Hyper-Heuristics genetic algorithm for stochastic job shop scheduling problem", International Journal of Applied Mathematics and Statistics, Volume 50, Issue No. 20.
- Livingston, Denise, Marques-Baptista, Andreia et Brown, Richard. (2010). "Prehospital intervention probability score: a novel method for determining necessity of emergency medical service units". The American journal of emergency medicine, vol. 28, no 5, 552-560
- Lopardo, G., Marin, C.A. et Mehandjiev, N. 2011. "A Diversity Analysis of the Impact of an Interoperability Tool to a Business Ecosystem", Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE) - IEEE, 35-40.
- Lopez, Beatriz, Innocenti, Bianca, et Busquets, Dídac (2008). "A multiagent system for coordinating ambulances for emergency medical services". Intelligent Systems, IEEE, vol. 23, no 5, 50-57.
- Maglaveras, N., V.G. Koutkias, I. Chouvarda, A. Triantafyllidis, A. Malousi et G.D. Giaglis. 2010. "A Personalized Framework for Medication Treatment Management in Chronic Care", IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, vol. 14, no. 2, 464-472.
- Maleki, M., Majlesinasab, N., et Sepehri, M. M. (2014). "Two new models for redeployment of ambulances". Computers & Industrial Engineering, 78, 271-284.
- Manacorda, P. M. et P. Pietroboni. 1981. "A Model of Evaluation of Health Services "By Objectives", Medical Informatics Europe 81, Lecture Notes in Medical Informatics, Volume 11, 130-137
- Mason, A.J. 2001. "Elastic constraint branching, the Wedelin/Carmen Lagrangian heuristic and integer programming for personnel scheduling". Annals of Operations Research - Basel, 108(1): 239-276.
- McNeil John J., Judy A. Lowthian, Peter A. Cameron, Johannes U. Stoelwinder, Andrea Curtis A., Alex Currell et Matthew W. Cooke. 2011. "Increasing utilisation of emergency ambulances". Australian Health Review.
- Metropolis, N., A.W. Rosenbluth, M.N. Rosenbluth et A.H. Teller. 1953. "Equation of State Calculations by Fast Computing Machines". The Journal of Chemical Physics, 21(6):1087-1092.
- Mills R.G.J. et D.M. Panton. 1992. "Scheduling of Casino Security Officers". Omega - Oxford, 20(2):183-191.

- Montalam M.A. et Vincent B. 2013. « Un modèle d'évaluation de la performance multidimensionnelle d'une organisation hospitalière transversale ». *Management et Avenir*, No. 61, 190-207.
- Morgans Amee E., Kate Cantwell, Paul Dietze et Karen Smith. 2013. "Ambulance demand: random events or predicable patterns?". *Emergency Medicine Journal*, 30:883-887.
- Moz M. et M.V. Pato. 2004. "Solving the Problem of Rerostering Nurse Schedules with Hard Constraints : New Multicommodity Flow Models". *Annals of Operations Research - Basel*, 128(1 :4) :179-197.
- MSSS. 1992. Ministère de la Santé et des Services sociaux de Québec. 1992. « Services préhospitaliers d'urgence au Québec: chaque minute compte! ». Bibliothèque nationale du Québec. ISBN 2-550-26429-0.
- MSSS. 2007. « Rapport final du comité technique sur le déploiement des services ambulanciers sur le territoire québécois ».
- MSSS. 2011. Ministère de la santé et des Services sociaux de Québec, Direction générale de la coordination régionale, Services préhospitaliers d'urgence. 2011. « Services ambulanciers, Guide de soutien à l'organisation », 30.
- MSSS. 2013. « Guide des responsabilités des agences de la santé et des services sociaux au regard des ressources intermédiaires et des ressources de type familial ». Bibliothèque et Archives Canada, ISBN : 978-2-550-68578-4.
- Mueller J. et B. Bauer. 2004. "Methodologies and modeling language, in Agent-Based Software Development", Londo: Artech House, 77-131.
- Mutera İ., Ş. İ. Birbila, K. Bülbüla, G. Şahina, H. Yenigüna, D. Taşb et D. Tüzünc. 2013. "Solving a robust airline crew pairing problem with column generation", *Computers & Operations Research*, Volume 40, Issue 3, 815–830.
- Norvig P. et S. Russel. 2009. "Artificial Intelligence: A Modern Approach". 3rd Edition. Prentice Hall, ISBN: 0-13-604259-7.
- Nowroozi, Alireza, SHIRI, Mohammad E. et Aslanian, Angeh (2012). "A general computational recognition primed decision model with multi-agent rescue simulation benchmark". *Information Sciences*, vol. 187, 52-71.
- OQLF. 2013. Le Grand dictionnaire terminologique, Office Québécois de la Langue Française, <http://www.gdt.oqlf.gouv.qc.ca/>.
- Or, I. 1976. "Traveling Salesman-type Combinatorial Problems and their relation to the Logistics of Blood Banking". PhD theses. Northwestern University Evenston Illinois.

- Padgham L. et M. Winikoff. 2003. "Prometheus: A Methodology for Developing Intelligent Agents", Agent-Oriented Software Engineering III. Springer Berlin-Heidelberg, Vol. 2585/2003, 174-185.
- Palazzo Luca, Paolo Sernani, Andrea Claudi, Gianluca Dolcini, Gianluigi Biancucci et Aldo Franco Dragoni. 2013. "A Multi-Agent Architecture for Health Information Systems". Proceeding of International Workshop on Artificial Intelligence and NetMedicine, IJCAI, China, 41-50.
- Patil Dipti, Mayuri Gund, Snehal Andhalkar et V. M. Wadhai. 2011. "An Intelligent Architecture for Multi-Agent Based m-Health Care System". International Journal of Computer Trends and Technology, IJCTT, ISSN: 2231-2803.
- Paulussen T. O., N. R. Jennings, K. S. 2003. "Decker et A. Heinzl. Distributed patient scheduling in hospitals", International Joint Conference on Artificial Intelligence.
- Pereira A., J. et Reis L. P. 2012. "Coastal Ecosystems Simulation: A Decision Tree Analysis for Bivalve's Growth Condition", Proceedings 26th European Conference on Modelling and Simulation, ECMS, 392-398.
- Phung Viet-Hai, Coster Joanne, Wilson Richard, Turner Janette, Booth Andrew et Siriwardena A. Niroshan. 2013. "Systematic review of prehospital outcomes for evidence-based evaluation of ambulance service care". Prehospital and Disaster Medicine. Lincoln University.
- Poitras Julien et Jean Lapointe. 2000. « Politique portant sur la direction médicale des services préhospitaliers d'urgence ». Journal de l'AMUQ.
- Quosséca. 2013. Site web de la Quosséca: « <http://www.crt.umontreal.ca/~quosseca/> ».
- Reddy, Madhu C., PAUL, Sharoda A. et Abraham, Joanna. (2009). "Challenges to effective crisis management: using information and communication technologies to coordinate emergency medical services and emergency department teams". International journal of medical informatics, vol. 78, no 4, 259-269.
- Roques, Pascal et Vallée, Franck. 2007. « UML 2 en action : de l'analyse des besoins à la conception ». Eyrolles, Paris, 4ème édition.
- Roughgarden, Joan. 2012. "Individual Based Models in Ecology: An Evaluation, or How Not to Ruin a Good Thing". 23rd Biennial Meeting. Philosophy of Science Association.
- Sanchez David, David Isern et Antonio Moreno. 2010. "Agents applied in health care: A review", Elsevier, International Journal of Medical Informatics, Volume 79, Issue 3, 145-166.

- Savsar, M., J. Alnaqi et M. Atash. 2013. "Scheduling and routing of city buses for a public transport company", *International Journal of Operational Research*, Volume 16, Number 3, 304-328.
- Schmid, Verena (2012). "Solving the dynamic ambulance relocation and dispatching problem using approximate dynamic programming". *European Journal of Operational Research*, vol. 219, no 3, 611-621.
- Setzler H., H. K. Rajagopalan, C. Saydam et E. Sharer. 2011. "Ambulance Deployment and Shift Scheduling: An Integrated Approach". *Scientific Search, Journal of Service Science and Management*, 4, 66-78.
- Shabbir Ahmed et Dimitri J. Papageorgiou. 2013. "Probabilistic Set Covering with Correlations". *Operations Research*, volume 61, Issue 2, 438-452.
- Shaft, D. et Cohen, R. 2013. "A Multiagent Approach to Ambulance Allocation Based on Social Welfare and Local Search", *12th International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA)*, IEEE, Vol. 2, 384 – 389.
- Shoham Yoav. 1993. "An Overview of Agent-Oriented Programming", *Journal of Artificial Intelligence - Elsevier*, Volume 60, Issue 1, 51-92.
- Shreiber A., B. J. Wielinga, J. M. Akkermans et W. Van de Velde. 1994. "CommonKADS : A comprehensive Methodology for KBS Development", *IEEE Expert: Intelligent Systems and Their Applications*, vol. 9, no. 6, 28-37.
- Simon Gates, Jessica Horton, Susie Hennings et Gavin Perkins. 2013. "Issues in the design and conduct of a multicentre trial in UK ambulance services". *BioMed Central*, 14, Suppl.1.
- Slotine J.J., Y.Y Liu et A.L. Barabasi. 2013. «Observability of complex systems». *PNAS*, Volume 110, No. 7, 2460–2465.
- Smet P., P. De Causmaecker, B. Bilgin et G. Vanden Berghe. 2013. "Nurse Rostering: A Complex Example of Personnel Scheduling with Perspectives". *Automated Scheduling and Planning Studies in Computational Intelligence*, Volume 505, 129-153.
- Sokolova, Marina V. and Caballero et Antonio Fernández (2012). "A Review on Frameworks for Decision Support Systems". In: *Decision Making in Complex Systems*. Springer Berlin Heidelberg, 19-45.
- Sorwar, Golam et Ali, Ameer (2010). "Advanced Telemedicine System Using 3G Cellular Networks and Agent Technology". In: *E-Health*. Springer Berlin Heidelberg, 187-197.

- Soto, Ricardo, Crawford, Broderick et Monfroy, Eric. (2013). "Nurse and paramedic rostering with constraint programming: A case study". *Romanian Journal of Information Science and Technology*, vol. 16, no 1, 52-64.
- Taillefer P. 2012. « Temps réponse des appels de priorité 01 pour l'exercice 2011-2012 pour l'Île de Montréal », Document de la corporation Urgences-Santé, 2.
- Taillefer P. 2012a. « Temps réponse des appels de priorité 01 pour l'exercice 2011-2012 pour l'Île de Montréal ». Document de la corporation Urgences-Santé, 3.
- Taillefer P. et M. Blais. 2012. « Rapport opérationnel ». Document de la corporation Urgences-Santé, 14.
- TALARICO, Luca, MEISEL, Frank et SÖRENSEN, Kenneth (2015). "Ambulance routing for disaster response with patient groups". *Computers & Operations Research*, vol. 56, 120–133
- Tapia Dante I., Sara Rodriguez et Juan M. Corchado. 2010. "A Distributed Ambient Intelligence Based Multi-Agent System for Alzheimer Health Care", Springer London, Computer Communications and Networks, Pervasive Computing, 181-199.
- Tian, Yu, Zhou, Tian-Shu et Wang, Yu (2014) "Design and Development of A Mobile-based System for Supporting Emergency Triage Decision Making". *Journal of Medical Systems*, vol. 38, no 6, 1-10.
- Toro-Díaz, H., Mayorga, M. E., Chanta, S. et McLay, L. A. (2013). Joint location and dispatching decisions for emergency medical services. *Computers & Industrial Engineering*, 64(4), 917-928.
- Toussaint J. S. et Berry L. L. 2013. « The Promise of Lean in Health Care », *Mayo Clinic Proceedings*, Vol. 88, No. 1, 74-82.
- Tranier J. 2007. «Vers une vision intégrale des systèmes multi-agents». PhD theses, Montpellier II University, Montpellier.
- Treuil, J.P., Drogoul, A. et Zucker, J.D. 2008. « Modélisation et simulation à base d'agents ». *Science Sup.*
- TWEEDALE, Jeffrey W. et JAIN, Lakhmi C. (2012). "Agent Interoperability and Adaptation". In : *Embedded Automation in Human-Agent Environment*. Springer Berlin Heidelberg, 63-72.
- Urgences-santé, Corporation d'Urgences-santé. 2011. « Rapport annuel de gestion 2010-2011 », ISBN 978-2-550-62206-2, Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 5.

- Urgences-santé, Corporation d'Urgences-santé. 2012. « État des résultats et de l'excédent cumulé de l'exercice clos le 31 mars 2013 », Selon le budget final approuvé par le conseil d'administration de la Corporation le 25 septembre 2012.
- Urgences-santé, Corporation d'Urgences-Santé. 2012c. « Document évaluatif sur les horaires ». Document de la corporation Urgences-Santé.
- Urgences-santé de Québec. Corporation d'Urgences-santé 2013. Site web : « www.urgences-sante.qc.ca ».
- Urgences-santé, Corporation d'Urgences-santé. 2013. « Rapport annuel de gestion 2012-2013 », Bibliothèque et Archives nationales du Québec, ISBN 978-2-550-68097-0.
- Urgences-santé, Corporation d'Urgences-santé. 2013a. « Protocoles d'intervention clinique à l'usage des premiers répondants », Bibliothèque et Archives du Canada, ISBN 978-2-550-69081-8.
- Urgences-santé, Corporation d'Urgences-santé. 2014a. « Centre de communication santé - Rôles et responsabilités des CCS », <https://www.urgences-sante.qc.ca/direction-medicale-nationalespu/centre-de-communication-sante/>.
- Urgences-santé, Corporation d'Urgences-Santé. 2014b. Site web: « <http://www.urgences-sante.qc.ca> ».
- Urgences-santé, Urgences-santé de Québec. 2014. « Déclaration de services aux citoyens », www.urgences-sante.qc.ca.
- V.A. Knight, P. R. Harper et L. Smith. 2012. "Ambulance allocation for maximal survival with heterogeneous outcome measures". Omega - Elsevier, volume 40, Issue 6, 918–926.
- Vincenota Christian Ernest, Francesco Gianninob, Max Rietkerkc, Kazuyuki Moriyaa et Stefano Mazzolenid. 2011. "Theoretical considerations on the combined use of System Dynamics and individual-based modeling in ecology", Ecological Modelling, Volume 222, Issue 1, 210–218.
- Wilson, Duncan T., Hawe, Glenn I. et Coates Graham (2013). "A multi-objective combinatorial model of casualty processing in major incident response". European Journal of Operational Research, vol. 230, no 3, 643-655.
- Wong H. T. et P. C. Lai. 2010. "Weather inference and daily demand for emergency ambulance services". Emergency Medicine Journal.
- Wooldridge M. 2002. "An Introduction to Multi-Agent Systems", John Wiley and Sons.
- Wren, A. et D.O. Wren. 1995. "A Genetic Algorithm for Public Transport Driver Scheduling", Computer Operations Research, 22(1):101 110.

- Wright D. et S. Mahar. 2013. "Centralized nurse scheduling to simultaneously improve schedule cost and nurse satisfaction". *Omega*, Elsevier, Volume 41, Issue 6, 1042–1052
- Xuemei Li, Feng Yunqing et Ning Ma. 2012. "Research of Traffic Share in Different Models of Transport Based on the Agent Theory", *Joint Rail Conference 2012*, ASME, 813-822.
- Zhang Hongwei, Frank L. Lewis, Kristian Hengster-Movric et Abhijit Das. 2014. "Cooperative Control of Multi-Agent Systems: Optimal and Adaptive Design Approaches". Springer, ISBN: 978-1-4471-5574-4.
- Zhang Hui, Yiwen Zhong et Jing Ning. 2012. "Multi-agent simulated annealing algorithm based on particle swarm optimisation algorithm", *International Journal of Computer Applications in Technology*, Volume 43, Number 4, 335-342.
- Zhang Jicong, Neng Fan, Syed Mujahid, Pando Georgiev, Petraq Papajorgji, Ingrida Steponavice, Britta Neugaard et Panos M. Pardalos. 2013. "Nurse Scheduling Problem: An Integer Programming Model with a Practical Application", *Systems Analysis Tools for Better Health Care Delivery Springer Optimization and Its Applications*, Volume 74, 65-98.

