UNIVERSITÉ FRANÇOIS RABELAIS DE TOURS

ÉCOLE DOCTORALE SST

LABORATOIRE D'INFORMATIQUE : EA2101

EQUIPE ORDONNANCEMENT ET CONDUITE

THÈSE présentée par :

Yannick KERGOSIEN

soutenue le : 5 Juillet 2010

pour obtenir le grade de : Docteur de l'université François - Rabelais

Discipline/ Spécialité : Informatique

Algorithmes de tournées de véhicules pour l'optimisation des flux de produits et de patients dans un complexe hospitalier

THÈSE DIRIGÉE PAR :

BILLAUT Jean-Charles	Professeur, Université François Rabelais Tours, LI

RAPPORTEURS :

FEILLET Dominique	Professeur, École des Mines de Saint-Etienne, CMP
PRINS Christian	Professeur, Université de Technologie de Troyes, ICD

JURY :

BILLAUT Jean-Charles	Professeur des Universités, Université François Rabelais Tours, LI
FEILLET Dominique	Professeur, École des Mines de Saint-Etienne, CMP
GOURGAND Michel	Professeur, Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, LIMOS
GUÉRET Christelle	Maître de Conférences, École des Mines de Nantes, IRCCyN
LENTÉ Christophe	Maître de Conférences, Université François Rabelais Tours, LI
PRINS Christian	Professeur, Université de Technologie de Troyes, ICD

MEMBRE INVITE :

DESMAZES Jean	Professeur, Université de la Rochelle, CEREGE-LR-MOS
OSU Dominique	Direction de la qualité et des relations avec les usagers, CHRU de Tours

Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier mes encadrants de thèse, Christophe Lenté et Jean Charles Billaut, pour m'avoir aidé, encouragé, orienté et conseillé durant ces trois années. Grâce à leurs conseils, leurs commentaires, leurs connaissances et leur bonne humeur, j'ai pu mener à bien cette thèse, progresser et élargir mes connaissances dans le monde de la recherche en général mais surtout dans le domaine de la Recherche Opérationnelle.

Je remercie aussi chaleureusement les membres de mon jury : Dominique Feillet et Christian Prins qui m'ont fait l'honneur d'accepter de rapporter cette thèse. Je remercie également Michel Gourgand d'avoir présidé ce jury et Christelle Guéret d'en avoir fait partie. Mes remerciements vont aussi à Jean Desmazes sans qui cette thèse n'aurait pas eu lieu ainsi que Dominique Osu pour nous avoir "ouvert les portes du CHRU". Enfin, je remercie le Conseil Général d'Indre et Loire pour le financement qui m'a été accordé pour le bon déroulement de cette thèse.

"Comment étudier des problèmes hospitaliers concrets si personne ne vous les expliquent ?", ainsi je tiens sincèrement à remercier toutes les personnes du CHRU de Tours qui m'ont accordé un temps précieux pour m'aider à définir et étudier ces problèmes. Je tiens particulièrement à remercier Sandrine Perrin et Jean-François Tournamille mais également Yves Guillou, Alain Lamy, Daniel Piton, Jean Louis Gigot, André Cousin, Philippe Jaulin, Anne-Marie Bailloux, Philippe Gadesaudes, Michel Morisset, Pascal Barat, Thierry Gautier, Nathalie Charles, Jean-Louis Ledeux.

Mes remerciements vont aussi à toutes les personnes appartenant à l'environnement de travail que j'ai côtoyé depuis plus de trois ans, à savoir les enseignants chercheurs et le personnel administratif de l'école Polytech'Tours (département informatique) ainsi qu'à son directeur Christian Proust. Ces remerciements vont également vers tous les membres de l'équipe Ordonnancement et Conduite du Laboratoire d'Informatique de l'université François Rabelais Tours. Parmi eux, je remercie particulièrement Ameur Soukhal, Emmanuel Néron, Vincent T'Kindt et Patrick Martineau avec lesquels j'ai passé de très bon moment et j'ai eu des échanges très intéressants pour ma thèse. Je remercie aussi tous les doctorants du Laboratoire avec lesquels j'ai passé également de bons moments. Enfin je remercie les étudiants que j'ai encadrés et qui ont participé à certains travaux de mes recherches, de loin ou de près. En particulier, je remercie Peter Bardu.

Pour terminer, je remercie spécialement toute ma famille et mes amis qui m'ont soutenu durant ces trois années.

Résumé

L'organisation des systèmes hospitaliers nécessite des prises de décision à plusieurs niveaux, qu'ils soient stratégiques comme le dimensionnement d'équipes ou plus opérationnels comme la planification de tournées. Les techniques et les outils de la Recherche Opérationnelle peuvent fournir une aide dans ces prises de décision. Cette thèse est une illustration de l'application des techniques de RO dans le contexte hospitalier du CHRU de Tours. D'une façon générale, la problématique abordée porte sur l'optimisation des tournées de véhicules. Cette thèse s'articule autour de l'étude de deux principaux problèmes : le transport de flux de produits et le transport de patients. Ces problèmes prennent une importance particulière au sein du CHRU de Tours du fait qu'il est composé de plusieurs hôpitaux éparpillés sur toute la ville.

Le premier problème concerne toute la gestion des différents types de flux logistiques (logistique hôtelière, pharmacie, lingerie, plateaux repas, etc.) à livrer ou à collecter dans les services de soins de chaque hôpital du CHRU de Tours. Cette problématique s'inscrit dans le cadre d'une étude sur la réorganisation de la logistique du CHRU. Cette réorganisation prévoit la re-planification des tournées de véhicules entre les différents hôpitaux, la mutualisation de transports, dans la mesure du possible et la création et le dimensionnement d'une équipe de manutentionnaires dans un hôpital de grande taille.

Le deuxième problème abordé concerne les transports de patients aussi bien urgents (SAMU) que planifiés (Centrale des ambulanciers). D'une part, une question de dimensionnement d'effectifs ou plus exactement de répartition d'ambulanciers entre le SAMU et la Centrale des ambulanciers, se pose. Mais d'autre part se pose aussi un problème d'affectation en temps réel des transports de patients à réaliser aux ambulances du CHRU.

Pour résoudre ces problèmes, plusieurs méthodes s'inspirant des techniques de la RO sont proposées : des méthodes exactes (modèles de programmation linéaire en nombres entiers), des heuristiques (algorithme glouton, recherche tabou avec et sans mémoire adaptatives, algorithme génétique, algorithme mémétique). Un moteur de simulation à événements discrets a été développé.

Mots clés : Recherche Opérationnelle ; Complexe hospitalier ; Optimisation ; Tournées de véhicules ; Problème de transports de patients ; Logistique hospitalière.

Abstract

Many problems of organization, planning, design and especially optimization are present in a general hospital context. These problems often lead to decision-making problems that can be solved by operational research techniques. This thesis is the OR problems illustration found in a general hospital context: the hospital complex of Tours. The problems studied in this thesis deal with vehicle routing problems and more precisely with the two following problems : transportation of commodities and transportation of patients. These problems are quite important for the hospital complex of Tours since the latter is composed of several hospital units scattered all around the town.

The first vehicle routing problem deals with the logistics flows in the hospital complex (clean linen, meal carts, medicines, sterile equipments, etc.), delivery or pickup in the hospital units, located at different places in the city. This study is part of a project of reorganization of the logistics flows. This reorganization includes a vehicle routing problem between different hospitals, the pooling of transport when possible, and the creation of a warehouse persons team inside a large hospital.

The second problem deals with the emergency patient transportation (Emergency Medical Assistance Service) as well as with the planned transports (ambulance central station). The first question is a question of design, it regards the distribution of the number of ambulance persons between the emergency service and the ambulance central station. The second question is a real time assignment problem, it regards the problem of transportation of patients by ambulances.

To solve these problems, several methods based on OR techniques have been proposed: exact methods (integer linear programming), heuristics (greedy algorithm, tabu search with and without adaptive memory, genetic algorithm, memetic algorithm), and discrete event simulation.

Keywords : Operational Research ; Hospital complex ; Optimization ; Vehicles routing ; transportation problem of patients ; Hospital Logistics.

Table des matières

Introduction générale **19**

La Recherche Opérationnelle et le milieu hospitalier . . . 19

Quelques illustrations de la RO appliquée au milieu hospitalier . . . 20

Objet et plan de la thése . . . 22

1 Présentation du contexte et des problématiques **25**

1.1 Contexte hospitalier à Tours . . . 26

1.2 La Logistique . . . 27

1.2.1 Les archives . . . 27

1.2.2 La blanchisserie . . . 29

1.2.3 L'UCPA . . . 29

1.2.4 La pharmacie . . . 30

1.2.5 La stérilisation . . . 30

1.2.6 La Logistique Hôtelière . . . 30

1.2.7 La salubrité . . . 31

1.2.8 Les services à livrer ou à collecter . . . 31

1.2.9 Le cas Bretonneau . . . 32

1.3 Centrale des ambulanciers et SAMU . . . 34

1.3.1 La Centrale des Ambulanciers . . . 34

1.3.2 Le SAMU . . . 37

1.4 Deux problématiques au CHRU de Tours . . . 39

1.4.1 Réorganisation de la logistique . . . 39

1.4.2 CA et SAMU . . . 40

1.5 Conclusion . . . 42

I Flux de matières **43**

2 Position du problème de la logistique **45**

2.1 Présentation générale 45
2.1.1 Rappel de la problématique 45
2.1.2 Objectif de l'étude 46
2.2 Littérature autour de ce problème 49
2.2.1 Introduction aux problèmes de transports 50
2.2.2 Problèmes de transports connexes 52
2.2.3 Problèmes de transports dans le milieu hospitalier 54
2.3 Conclusion 56

3 Optimisation des tournées et dimensionnement des équipes : Modèle exploratoire 59
3.1 Définition et notation du problème 59
3.2 PLNE 61
3.2.1 Les variables 62
3.2.2 Les contraintes 62
3.2.3 Fonction objectif 67
3.2.4 Taille du PLNE 68
3.3 Algorithme génétique 68
3.3.1 Codage et évaluation d'un individu 70
3.3.2 Initialisation d'une population 74
3.3.3 Sélection des individus 75
3.3.4 Croisement des individus 75
3.3.5 Mutation des individus 76
3.4 Recherche tabou 77
3.4.1 Construction d'une solution initiale 77
3.4.2 Opérateur de voisinage 78
3.4.3 Liste tabou 78
3.5 Résultats expérimentaux 78
3.5.1 Génération d'instances 79
3.5.2 Résultats pour le PLNE 80
3.5.3 Résultats pour les méta-heuristiques 81
3.6 Conclusion 85

4 Optimisation des tournées et dimensionnement des équipes : Modèle appliqué 87
4.1 Contraintes et hypothèses du modèle appliqué 87
4.2 Impacts sur les algorithmes existants 91
4.3 Algorithme mémétique 93

4.4 Résultats expérimentaux . . . 93
4.4.1 Génération d'instances . . . 93
4.4.2 Algorithme génétique . . . 97
4.4.3 Algorithme tabou . . . 99
4.4.4 Algorithme mémétique . . . 102
4.4.5 Comparaison des trois algorithmes . . . 103
4.5 Conclusion . . . 107

5 Simulation du modèle appliqué 109
5.1 Objectif de la simulation . . . 109
5.2 Modélisation du système . . . 111
5.2.1 Le système général . . . 111
5.2.2 Les entités . . . 112
5.2.3 Les ressources . . . 116
5.2.4 Les événements . . . 116
5.3 Implémentation et résultats . . . 117
5.3.1 Comparaison des résultats de la simulation et de l'algorithme . . . 117
5.3.2 Indicateurs fournis par le simulateur . . . 118
5.4 Conclusion . . . 125

II Le transport de patients 127

6 Position du problème 129
6.1 Présentation générale . . . 129
6.1.1 Problème dynamique de transports de patients . . . 129
6.1.2 Dimensionnement et d'affection des ambulanciers . . . 131
6.2 Littérature autour de ce problème . . . 131
6.2.1 Problèmes de tournées sur arcs . . . 132
6.2.2 Le problème du voyageur de commerce . . . 139
6.2.3 Problèmes de transports dans le milieu hospitalier . . . 141
6.3 Conclusion . . . 144

7 Optimisation des tournées 147
7.1 Modèle statique du problème des ambulanciers . . . 147
7.1.1 Définition et modélisation . . . 147
7.1.2 Résolution exacte (PLNE) . . . 150
7.1.3 Recherche tabou avec mémoire adaptative dans le cas statique . . . 154
7.1.4 Résultats expérimentaux . . . 160

7.1.5 Conclusion . . . 163
7.2 Modéle dynamique intégrant des contraintes spécifiques aux transports hospitaliers de patients . . . 164
7.2.1 Définition et modélisation . . . 164
7.2.2 Recherche tabou avec mémoire adaptative dans le cas dynamique . 168
7.2.3 Résultats expérimentaux . . . 173
7.2.4 Conclusion du modèle dynamique . . . 179
7.3 Conclusion du chapitre . . . 179

8 Dimensionnement et affectation des ambulanciers 181
8.1 Introduction au problème . . . 181
8.2 Etude et modélisation du problème . . . 183
8.2.1 Description du système . . . 183
8.2.2 Les données physiques . . . 186
8.2.3 Représentation d'une solution . . . 186
8.2.4 Les variables aléatoires du système . . . 188
8.3 Choix de l'outil d'aide à la décision . . . 189
8.4 Conclusion . . . 191

Conclusion générale 193

Annexes 201

A Etude complète des flux 201
A.1 Préambule . . . 201
A.2 Introduction . . . 201
A.3 Les Archives . . . 202
A.4 La Blanchisserie . . . 204
A.5 Le Logicourses . . . 207
A.6 La Logistique Hôtelière . . . 208
A.7 La Pharmacie . . . 211
A.8 La Salubrité . . . 212
A.9 La Stérilisation . . . 215
A.10 L'UCPA . . . 217
A.11 Eléments à inclure dans l'étude . . . 220
A.12 Annexes . . . 223

B Répertoire de problèmes d'optimisation de tournées 235

C Analyse des variables aléatoires liées aux transports de patients **243**

Glossaire **261**

Liste des tableaux

1.1 Equipes Ambulancières 35

3.1 Taille des instances testées 68
3.2 Résultat pour le PLNE 81
3.3 Résultat pour l'AG 82
3.4 Résultats des six configurations de l'AG 82
3.5 Résultats pour la recherche tabou 83
3.6 Résultats des trois combinaisons 84

4.1 Différences entre le modèle exploratoire et le modèle appliqué 88
4.2 Flux logistiques de l'instance théorique 95
4.3 Bornes inférieures du temps total des livraisons 97
4.4 Résultat pour l'AG avec $\#ite = 200$ 97
4.5 Résultat pour l'AG avec $\#ite = 400$ 98
4.6 Résultats des six configurations de l'AG avec $\#ite = 200$ 98
4.7 Résultats des six configurations de l'AG avec $\#ite = 400$ 99
4.8 Résultats pour la recherche tabou avec $\#ite = 5000$ 100
4.9 Résultats pour la recherche tabou avec $\#ite = 10000$ 100
4.10 Résultats des six meilleures combinaisons avec $\#ite = 5000$ 101
4.11 Résultats des six meilleures combinaisons avec $\#ite = 10000$ 101
4.12 Résultats pour l'algorithme mémétique avec une population de 100 individus 102
4.13 Résultats pour l'algorithme mémétique avec une population de 200 individus 102
4.14 Résultats des six meilleures combinaisons avec une population de 100 individus 103
4.15 Résultats des six meilleures combinaisons avec une population de 200 individus 104
4.16 Comparaison des trois algorithmes 105
4.17 Comparaison entre l'algorithme mémétique et une hybridation à deux temps 106

5.1 Résultats de la simulation et de l'algorithme 118

7.1 Temps moyen de résolution pour le PLNE 161

7.2 Pourcentage d'instances résolues par le PLNE en moins de 1h30 161
7.3 Comparaison des deux méthodes 162
7.4 Amélioration de la meilleure solution initiale 163
7.5 Degrés de dynamisme d'instances réelles 173
7.6 Degrés de dynamisme des instances générées 175
7.7 Comparaison entre $TSAM_{Dyn}$ et $TSAM_{Static}$ 177
7.8 Comparaison entre $TSAM_{Dyn}$ et $TSAM_{Dyn-AM}$ 177
7.9 Comparaison entre $TSAM_{Dyn}$ et $TSAM_{Dyn-LT}$ 178
7.10 Nombre moyen de transports sous-traités 178

A.1 Stérilisation de Trousseau 216

Table des figures

1.1 Organigramme partiel du CHRU 27
1.2 Carte des sites du CHRU sur Tours 28
1.3 Plan de Bretonneau et modes de livraison par bâtiment 33

2.1 Carte de Tours 48
2.2 Réseaux des tournées 50
2.3 Résumé d'une classification des problèmes de tournées de véhicules (Berbeglia et al. [17]) 51

3.1 Illustration du codage 70
3.2 Illustration du codage 71
3.3 Partially Mapped Crossover 76
3.4 Opérateur insertion 76

4.1 Plan de Bretonneau 90
4.2 Comportement des manutentionnaires 92
4.3 Répartition des chariots par point de livraison 96

5.1 Système optimisation et simulation 110
5.2 Diagramme d'états-transitions d'une tournée inter-hôpitaux 113
5.3 Diagramme d'états-transitions d'une tournée intra-Bretonneau 115
5.4 Courbes de charges d'utilisation des fenwicks 119
5.5 Taux d'utilisation des fenwicks 120
5.6 Information sur la tournée numéro 58 121
5.7 Temps de retard moyen des fin de tournées le jeudi 122
5.8 Visualisation des tournées inter-hôpitaux 123
5.9 Visualisation des tournées intra-Bretonneau 124

7.1 Modélisation en PVC 149
7.2 CROSS exchange 158

7.3 Illustration de l'exemple 167
7.4 Route de l'équipe 1 168
7.5 Route de l'équipe 2 168
7.6 Evolution de la qualité des solutions en fonction du nombre d'itération j . . 176

8.1 Acteurs et Ressources du problème de répartition des ambulanciers 182
8.2 Diagramme d'activité du SAMU 185
8.3 Diagramme d'activité de la Centrale des Ambulanciers 187
8.4 Prototype du simulateur 190

A.1 Horaire pour le linge propre 206
A.2 Flux du linge 207
A.3 Circuit DASRI 213
A.4 Circuit DMA et DASRI 214
A.5 Sites intermédiaires à Bretonneau 216
A.6 Tournées de la semaine 224
A.7 Tournées du WE 225

C.1 Intervention Primaire 243
C.2 Durée intervention Primaire 244
C.3 Intervention Secondaire intra muros 245
C.4 Intervention Secondaire inter CH 245
C.5 Intervention Secondaire pédiatrique 246
C.6 Nombre de demandes en moyenne par jour (WE compris) par créneau horaire (CA) 246

Introduction générale

La Recherche Opérationnelle et le milieu hospitalier

Dans tous les pays, les milieux hospitaliers présentent de nombreux problèmes d'organisation, de planification, de dimensionnement, et surtout d'optimisation. Ces problèmes sont généralement liés à la gestion des ressources, comme par exemple les lits, les blocs opératoires, les véhicules (ambulances ou camions de logistique), les stocks de matières ou de produits ou encore les ressources humaines. Ils se posent souvent comme des problèmes d'aide à la décision et ils peuvent être abordés par des techniques scientifiques. C'est le domaine de la Recherche Opérationnelle (RO), de fournir les outils informatiques d'aide à la décision qui permettront une bonne gestion des ressources. Cette thèse est une illustration de problèmes de RO abordés dans un contexte hospitalier. La problématique abordée relève des transports et plus exactement de tournées de véhicules.

En France, le milieu hospitalier s'est depuis longtemps développé et organisé en fonction des activités des médecins ou des patients. Par exemple dans la gestion des blocs opératoires, les ressources du type salles d'opérations ou personnel infirmier sont programmées en fonction de la disponibilité du médecin/chirurgien ou de leurs choix du jour à opérer le patient. Autre exemple, la logistique des hôpitaux doit souvent se plier aux exigences des unités de soins sur l'horaire des livraisons et les quantités de produits. Cependant, depuis quelques années, la réorganisation du milieu hospitalier est devenue un sujet sensible à cause principalement du coût total qu'engendre le bon fonctionnement d'un hôpital. Ces réorganisations passent aussi bien par la mutualisation des ressources, par leur redimensionnement, par l'intégration de nouvelles règles de gestion, ou encore par l'externalisation de certains services vers des entreprises privées. Néanmoins, ces choix stratégiques sont complexes en raison du caractère incertain des activités de l'hôpital, celui-ci étant tout simplement lié à l'aspect imprévisible du parcours du patient (date de départ et d'arrivée, pathologie, etc.). L'aide à la décision ou la RO peut contribuer à la recherche de bons choix stratégiques pour l'optimisation de l'utilisation des ressources, et donc par ce biais diminuer les coûts.

La RO regroupe des méthodes scientifiques pour la prise de bonnes décisions en rationalisant, simulant, ou encore optimisant les systèmes de production ou organisationnels. C'est une discipline à l'intersection des domaines des mathématiques, de l'informatique, et des sciences économiques. Ses domaines d'application sont nombreux : chaîne de produc-

tion dans les ateliers, logistique et transports, gestion de projets, planification de personnel, ordonnancement, investissement financiers, etc. Cependant, les applications de la RO ont essentiellement porté sur le milieu de l'industrie depuis plus de 50 ans. En France, la RO n'est impliquée que depuis peu dans le milieu hospitalier, alors que dans d'autres pays essentiellement anglophones cette activité existe depuis 35 ans (création du groupe ORAHS[1]). L'une des causes principales tient probablement à la particularité du système économique des hôpitaux en France. Aujourd'hui le milieu hospitalier est un domaine d'application de la RO très porteur et innovant. Les problèmes extraits de ce milieu sont originaux en raison non seulement de leur caractère aléatoire mais aussi par l'apparition de nouvelles contraintes différentes et parfois plus complexes que celles rencontrées dans le milieu industriel (on ne produit pas des objets mais des soins). Ainsi, dans la communauté de la RO, le nombre d'articles, livres, publications et présentations dans les conférences augmente considérablement depuis ces dernières années.

En avril 2002, un chercheur Canadien nommé Michael Carter expose la nécessité des professionnels de la RO à travailler dans ce domaine hospitalier en commençant son article [31] par ces quelques mots : *"Health care is the No. 1 domestic industry in the United States and one of the largest industries in the developed world. Health care systems present many complex problems that could benefit from operations research-type analysis and applications. OR professionals, however, have generally neglected the field. "*

La section suivante présente les travaux de recherche les plus pertinents dans le domaine.

Quelques illustrations de la RO appliquée au milieu hospitalier

Cette section ne présente pas une liste exhaustive de toutes les applications de la RO dans le milieu hospitalier mais seulement un ensemble d'exemples très récents montrant le vaste spectre des travaux de recherche dans ce domaine. Pour un tour d'horizon plus complet dans ce domaine, il existe plusieurs états de l'art généraux : l'un des premiers fut de Fries en 1976 [78], puis Rosenhead [171], Boldy et O'Kane [20], Boldy [19], Datta [52], ou encore Wiers [194]. Il existe aussi d'autres états de l'art dédiés à des problèmes récurrents dans le milieu hospitalier comme l'ordonnancement des blocs opératoires de Cardoen et al. [30], la planification d'horaires de travail des infirmières de Burke et al. [27], l'application de la simulation à événements discrets au sein d'un système hospitalier de Jun et al.[108], les critères de mesure de performance d'un système de santé de Li et Benton [136], ou encore le processus d'analyse hiérarchique pour la prise de décisions dans le milieu médical de Liberatore et Nydick [137].

L'un des domaines de la RO le plus appliqué dans le milieu de la santé est l'ordonnancement. Récemment, encore un grand nombre d'articles de revues abordant des problèmes d'ordonnancement dans le milieu hospitalier ont vu le jour. L'ordonnancement des blocs opératoires est le problème qui a été le plus étudié durant ces dernières années. Ce type de

[1] Operational Research Applied to Health Services, groupe de travail d'EURO : Association of European Operational Research Societies

problème consiste à ordonnancer les opérations des patients dans les salles d'opérations en fonction des chirurgiens (Fei et al.[68]), ou en considérant des priorités chez les patients (cf. Min et Yih[145]), ou en tenant compte du nombre de lits dans la salle de réveil (cf. Augusto et al.[8]), ou encore avec de nombreuses contraintes humaines (cf. Roland et al. [168]). Mais il existe bien d'autres problèmes d'ordonnancement. Toujours récemment, Demeester et al. [55] présentent un problème d'ordonnancement pour l'affectation des patients aux lits dans les services appropriés, en tenant compte des besoins médicaux ainsi que leurs préférences tout en gardant un nombre équilibré de patients dans les différents services. Dans [38], Confori et al. s'intéressent à la gestion optimale des patients en attente de traitements de radiothérapie. L'objectif de cette étude est de diminuer le temps d'attente pour les traitements des patients étant atteints d'un cancer. D'autres problèmes d'ordonnancement récents subsistent encore, aussi bien avec un cas d'étude précis comme l'ordonnancement de médicaments chimio-thérapeutiques dans un hôpital [96] ou à livrer à domicile [33], ou l'ordonnancement en lignes de tâches dans les hôpitaux [71]. Enfin, la thèse de Beliën [15] sur les problèmes d'ordonnancement dans le milieu hospitalier est particulièrement intéressante puisqu'elle expose aussi de nombreux autres cas d'études.

Un autre sous-domaine de la RO proche de l'ordonnancement touche à la planification du personnel, qui est aussi amplement étudiée dans le milieu hospitalier. Trouver un ensemble d'horaires de travail pour le personnel, de manière à répondre à la charge de travail, est souvent difficile si on tient compte des nombreuses contraintes législatives. Ce processus est encore plus difficile lorsque la charge de travail n'est pas connue à l'avance. La catégorie de personnel à planifier la plus étudiée est sans doute celle des infirmiers/infirmières. Récemment encore, deux nouveaux articles traitent de la planification des infirmiers dans les hôpitaux : Glass et Knight [87], et Burke et al. [28]. Néanmoins, il existe aussi des articles apparus dernièrement sur la planification du personnel hospitalier en général dans le cas d'un département d'urgence médicale (Puente et al. [163]), ou en tenant compte de l'ancienneté des personnes (Topaloglu [189]).

Le thème général de la gestion de la chaîne logistique fait aussi l'objet de cas d'études dans le milieu de la santé. Ce thème consiste à améliorer la gestion de flux (marchandises, financiers et même informations) au sein d'une structure et de son environnement de manière à diminuer les coûts et améliorer ou respecter la qualité de service ou production (un exemple est disponible dans un article de Féniès et al.[76]). Clairement, la gestion de la chaîne logistique apparaît comme un facteur clé de l'amélioration de la gestion d'une structure hospitalière, aussi bien pour le flux d'information comme le montre l'article récent de Pedroso et Nakano [159], ou du flux matériel comme l'évoque l'article de Lapierre et Ruiz [128]. Dernièrement, des travaux sur la gestion de la chaîne logistique dans des situations d'urgences ont été menés, comme par exemple sur la chaîne d'approvisionnement et de distribution de fournitures médicales (cf. King et Muckstadt [125]). Enfin, dans l'une des dernières études de Sinha et Kohnke [178], l'ensemble de la chaîne logistique est abordé dans l'optique d'améliorer la qualité des soins délivrés.

Parmi les outils classiques de la RO autres que les méthodes de résolution, la simulation est un outil très utilisé dans le milieu hospitalier. C'est un outil permettant de simuler le

fonctionnement d'un système réel à l'aide de modèles. Elle permet de mesurer les conséquences des décisions de logistique, de conception, de gestion ou encore d'investissement. Elle est d'autant plus utile que le système simulé est soumis à des événements aléatoires, ce qui est le cas dans le milieu hospitalier. Les applications récentes utilisant la simulation dans ce milieu sont diverses et variées (Brailsford et al. [24]). La simulation peut être aussi bien utilisée pour simuler le service d'admission de patients pour la régulation du flux de patients et des taux d'occupations des lits dans les différents services (Oddoye et al. [154]), qu'à déterminer le nombre de lits dans une "Postanesthesia Care Unit" (Marcon et al. [140]). La simulation est aussi un outil très avantageux pour évaluer les meilleures décisions à prendre, comme par exemple le choix des parcours de patients dans un hôpital en fonction de leur maladie (Cardoen et Demeulemester [29]) ou encore le dimensionnement et l'organisation d'un futur bloc obstétrique (Chabrol et al. [32]). Enfin, la simulation est souvent couplée avec des modèles d'optimisation comme par exemple dans le cas d'ordonnancement de patients dans les blocs opératoires, ce qui a été étudié dernièrement en Suède par Persson et Persson [160].

Dans le milieu hospitalier, les problèmes de transports de personnes ou de biens sont aussi étudiés depuis quelques temps. Comme cette problématique est étudiée dans cette thèse, un état de l'art détaillé est présenté dans la partie 1 pour les transports de personnes, et dans la partie 2 pour les transports de biens. Enfin, d'autres études récentes, variées et intéressantes peuvent être encore citées. Etant donné leurs quantités, elles sont regroupées dans des éditions spéciales de journaux de la recherche opérationnelle comme *European Journal of Operational Research* (EJOR) [23], dans des livres suite à des conférences comme dernièrement "Intelligent Patient Management"[141], ou tout simplement dans les traditionnels journaux de la RO appliquée au milieu hospitalier (*Health Care Management Science, Journal of healthcare information management, The International Journal of Health Planning and Management, Journal of Health Management, Journal of Health Organisation and Management*, etc.).

Objet et plan de la thèse

Cette thèse s'articule autour de l'étude de deux activités critiques du CHRU de Tours : le transport de flux de matières et le transport de patients.

- Le premier problème de transport concerne toute la gestion des différents types de flux matériels (logistique hôtelière, pharmacie, lingerie, plateaux repas, etc.) à livrer ou à collecter dans les services de soins chacun dans plusieurs hôpitaux du CHRU de Tours. Nous nous intéresserons aussi à la livraison et à la collecte à l'intérieur du plus grand hôpital du CHRU (Bretonneau). Il apparaît ici donc deux niveaux de planification de transports de ce flux matériel, les deux étant interconnectés. Le premier niveau consiste à planifier les trajets (itinéraires, horaires, équipes, etc.) de manière à mieux desservir chaque hôpital sans que chaque type de flux interfère avec d'autres (problème d'espace de livraison), et de manière à respecter tout un ensemble de contraintes. Le deuxième niveau consiste à gérer ce même problème mais au sein

d'un hôpital. Etant donné un ensemble de points de livraison, le but est d'établir une solution, au niveau structure et personnel, pour que chaque service de cet hôpital puisse être desservi en temps et en heure.
- Le deuxième concerne les transports de patients aussi bien urgents (SAMU[2], Pompier, etc.) que planifiés (Centrale des Ambulanciers). Les transports urgents sont gérés par le CETRA 37 (celui-ci regroupe en un lieu unique la régulation médicale du SAMU et la gestion opérationnelle des sapeurs-pompiers), qui gère les urgences primaires et secondaires. Les transports planifiés ne correspondent pas à des urgences mais à des transports prévus à l'avance de patients entre différentes unités de soins nécessitant un véhicule, ils sont gérés par la Centrale des Ambulanciers.

Afin de présenter ces travaux de recherche, ce manuscrit est organisé en 11 chapitres regroupés en deux parties. Avant d'aborder ces deux grandes parties, un premier chapitre introductif présente le contexte de ce travail et les problématiques de départ. Une première section porte sur l'environnement hospitalier de Tours, et une seconde expose les deux problématiques du Centre Hospitalier Régional Universitaire de Tours (CHRU) que nous avons abordées. Puis, cinq chapitres composent la première partie traitant du problème de transport des flux de matières. Elle commence par le chapitre 2 qui positionne le problème avec une présentation générale et une revue de littérature autour de ce problème. Le deuxième et troisième chapitre de cette partie traitent du problème d'optimisation des tournées et de dimensionnement des équipes des logistiques hospitalières. L'étude de ce problème est décomposée en deux chapitres 3 et 4 puisque le problème a été abordé en deux étapes de modélisation. Le chapitre 5, de la première partie présente un modèle de simulation pour ce problème permettant de vérifier la validité d'une solution dans un environnement aléatoire. Nous conclurons cette première partie dans le chapitre 6. La deuxième partie est divisée en quatre chapitres. Ces quatre chapitres abordent respectivement le positionnement du problème avec une présentation générale et une revue de littérature autour de ce problème (chapitre 7), l'optimisation des tournées d'ambulances liée à ce problème de transports de patients (chapitre 8), et le problème de dimensionnement et d'affectation des ambulanciers (chapitre 9). Nous conclurons cette deuxième partie dans le chapitre 10. Enfin le dernier chapitre de cette thèse conclut sur les contributions apportées et les perspectives de recherche dans ces deux problématiques.

Un ensemble d'annexes est joint à ce document, concernant des travaux qui ont été accomplis dans le cadre de cette thèse. La première annexe présente une étude complète sur l'analyse des différents flux logistiques hospitaliers qui a été réalisée en amont de la deuxième problématique. La deuxième répertorie quelques problèmes d'optimisation de tournées en lien avec cette étude. Et la troisième annexe présente quelques représentations graphiques pour l'analyse de variables aléatoires liées aux transports de patients urgents.

[2]Service d'Aide Médicale Urgente

Chapitre 1

Présentation du contexte et des problématiques

Suite à plusieurs réunions exploratoires avec le CHRU de Tours, trois thèmes de travail ont été identifiés :

- la gestion des flux logistiques sur deux niveaux : entre les hôpitaux du CHRU de Tours et au sein d'un vaste hôpital, l'hôpital Bretonneau (mise en place d'une équipe de manutention et réorganisation des flux) ;
- la planification des transports des patients, urgents ou non, en particulier entre les divers hôpitaux qui composent le CHRU de Tours ;
- la gestion du matériel dans le futur bloc opératoire de l'hôpital Trousseau.

Pour des raisons de temps et étant donné l'ampleur des travaux, nous avons décidé de retenir uniquement les deux premiers thèmes, liés aux transports. Afin de nous familiariser avec le fonctionnement et surtout les contraintes des services concernés (Centrale des Ambulanciers, SAMU et les différents services logistiques), nous avons systématiquement interviewé les responsables et réalisé des visites sur site. Cela nous a permis de réaliser un état des lieux précis sur les différents flux et sur les points pouvant être abordés et résolus par des techniques de Recherche Opérationnelle.

Ce chapitre présente le contexte général des travaux de recherche effectués durant cette thèse et leurs champs d'application dans le cadre du CHRU de Tours. Après une première partie consacrée à la présentation générale du CHRU de Tours, une deuxième et une troisième partie présentent les services concernés que sont les diverses logistiques (les Archives, la Blanchisserie, l'Unité Centrale de Production Alimentaire, la Pharmacie, la Stérilisation, la Logistique Hôtelière et la Salubrité) ainsi que la Centrale des Ambulanciers et le SAMU. La dernière partie du chapitre expose les deux grandes problématiques qui ont été traitées (transport de patients et logistique).

1.1 Contexte hospitalier à Tours

Afin de mieux comprendre les enjeux des problématiques posées, une présentation du contexte hospitalier dans le région de Tours est nécessaire. Les sites géographiques et quelques chiffres clés sont listés de manière à présenter l'importance et l'étendue des activités du CHRU de Tours.

Le CHRU de Tours (ville comptant plus de 300 000 habitants avec l'aglomération), regroupe 6 sites de soins : l'hôpital Bretonneau, l'hôpital Trousseau, l'hôpital Clocheville, l'hôpital Ermitage, le Centre Psychothérapique de Tours Sud (CPTS), et le Centre Psychiatrie Universitaire (CPU). Les premiers bâtiments ont été construits au XVème siècle, depuis le CHRU de Tours n'a cessé d'évoluer pour devenir le plus grand établissement de santé de la région Centre avec un budget de plus de 320 millions d'Euros. Pour avoir une idée de l'activité, le CHRU de Tours soigne par an près de 80 000 patients en hospitalisation complète (>24h) avec une durée de séjour en moyenne de 6 jours, et environ 110 000 patients en hospitalisation de jour (<24h). Environ 25% des patients sont originaires d'autres départements que l'Indre et Loire. Pour accueillir toutes ces personnes, il y a au total plus de 2 000 lits et plus de 7 600 personnes travaillant au CHRU (premier employeur de la région Centre). Les services enregistrant la plus forte attractivité sont la chirurgie cardiaque/pédiatrique, l'oncologie pédiatrique, la biologie de la reproduction, et le service des brûlés. Parmi les chiffres clés intéressants de 2008, nous pouvons citer :

- Les types de soins majeurs : 41 252 interventions chirurgicales, 9 160 séances de chimiothérapie, 22 377 séances de radiothérapie et 368 861 consultations externes.
- Les urgences : 90 259 passages aux urgences, 89 065 affaires traitées par le SAMU, 4 100 sorties terrestres du Service Mobile d'Urgence et de Réanimation (SMUR) et 657 sorties en hélicoptère.
- Le plateau technique : 51 salles d'opérations, 27 salles de radiologie, 31 échographes lourds et 12 laboratoires.
- Et aussi : 49 660 patients transportés par ambulance et Véhicule Sanitaire Léger (VSL), 1 549 566 repas servis aux patients et personnels du CHRU et 3 306 tonnes de linge lavé.

La direction du CHRU est divisée en plusieurs pôles comme le montre l'organigramme de la figure 1.1.

L'inconvénient du CHRU de Tours est l'éparpillement géographique de ses établissements dans Tours comme le montre la figure 1.2. Sur cette carte figurent les six sites de soins, le CETRA, la Centrale des Ambulanciers (CA) et les dépôts des différentes logistiques : la Salubrité, les Archives, la Blanchisserie, et le "Logipôle" qui est constitué de la Logistique Hôtelière, de la Pharmacie et de l'UCPA.

Nous allons maintenant détailler davantage les deux services sur lesquels notre étude a principalement porté. Le paragraphe 1.2 présente la logistique et le paragraphe 1.3 présente la Centrale des Ambulanciers et le SAMU.

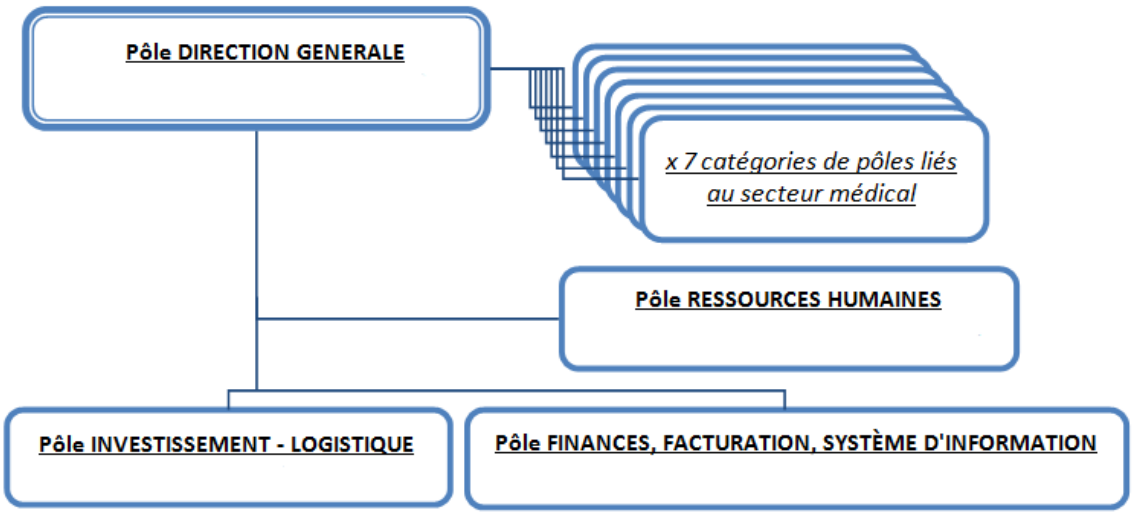


FIG. 1.1 – Organigramme partiel du CHRU

1.2 La Logistique

Plusieurs circuits logistiques se sont mis en place, de manière à réapprovisionner tous les services appartenant au CHRU en linge propre, matériel, repas, médicament, etc., mais aussi à collecter les déchets et le linge sale. L'organisation et la structure de ces logistiques sont conséquentes en raison de l'ampleur du CHRU et des quantités des produits consommés ou utilisés, ainsi que du fait que les services sont dispersés sur six sites distants. L'un des premiers travaux fut de dresser, suite à de nombreuses visites et réunions, un état des lieux de l'ensemble de ces logistiques ou flux, d'un point de vue transport et de leurs principales contraintes. Ce document est disponible en annexe A. Cette section résume chaque flux individuellement, afin de bien dissocier les éléments de l'étude, les éléments considérés en tant que contraintes, et les éléments non retenus pour cette étude. D'un point de vue général, les septs flux considérés sont les suivants :

- Salubrité,
- Archives,
- Blanchisserie,
- UCPA,
- Stérilisation (uniquement Trousseau),
- Logistique Hôtelière,
- Pharmacie.

Enfin, cette section se termine par une description des "clients" de ces logistiques : les services, ainsi que leur environnement et en particulier le cas de Bretonneau.

1.2.1 Les archives

Cette logistique assure le stockage et le transport des dossiers patients. Les personnes des archives s'occupent d'une part de collecter les dossiers patients qui ne sont plus utilisés dans les services de soins et d'autre part de livrer les dossiers patients demandés par le

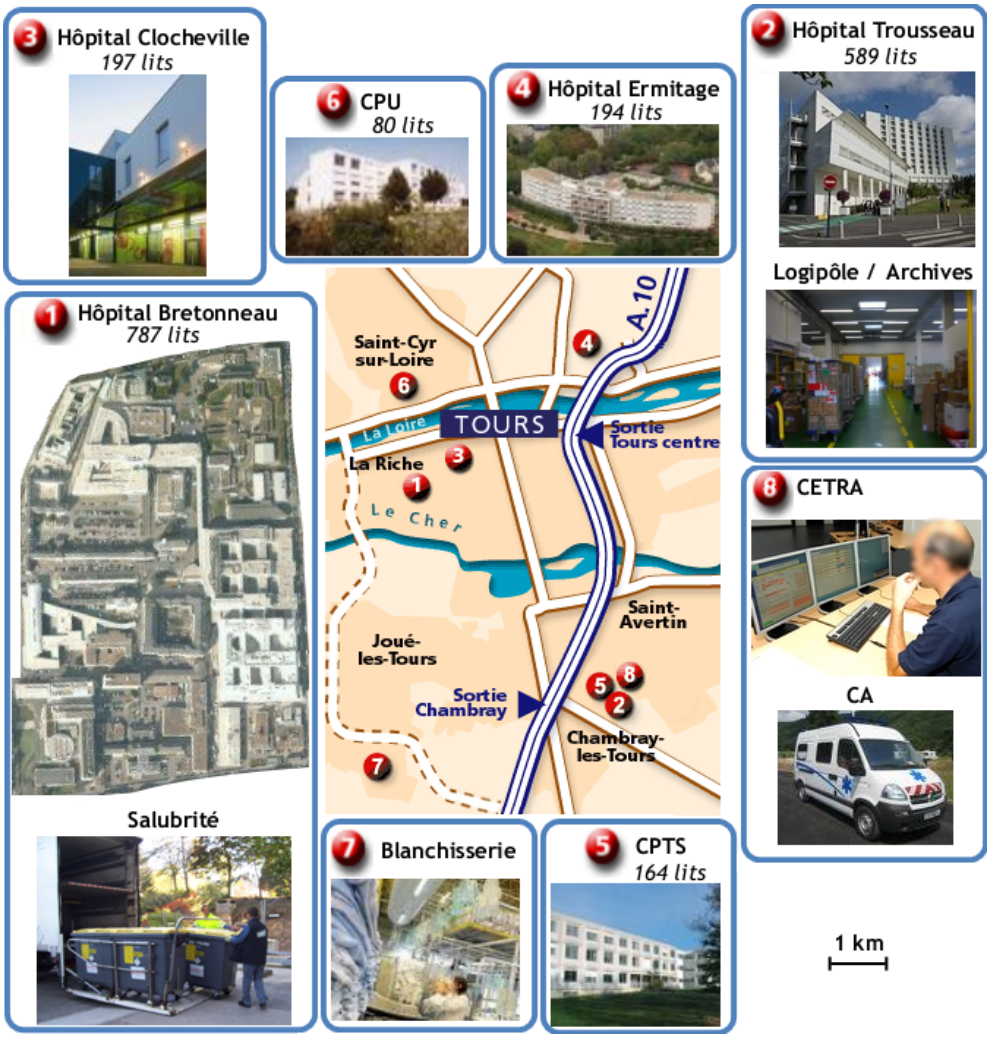


FIG. 1.2 – Carte des sites du CHRU sur Tours

personnel des services de soins. Les dossiers patients sont donc soit entreposés aux archives (proche de Trousseau) soit dans les stockages de proximité des hôpitaux. Plus de 35 km linéaires de dossiers sont actuellement entreposés. Pour des raisons de confidentialité, les dossiers sont livrés et collectés dans des armoires verrouillées en des lieux de stockages de proximité dont l'accès nécessite un badge. De plus, les temps de livraison et de collecte ne sont pas négligeables à cause principalement du classement des dossiers. Actuellement, les archives possèdent un véhicule qui effectue une tournée journalière avec deux personnes. Elle livre le matin à trois points : Trousseau, Bretonneau, et Clocheville. Les armoires sont ensuite ramenées aux archives de manière à traiter les dossiers retournés et à les ranger.

1.2.2 La blanchisserie

La blanchisserie s'occupe de toute la lingerie du CHRU (environ 15 tonnes de linge lavé par jour de semaine). Située à Tours sud, elle est distante de tous les autres sites. Le flux blanchisserie doit être décomposé en deux types de flux : la collecte du linge sale et la livraison du linge propre. Livraisons et collectes ne s'effectuent pas par les mêmes véhicules à cause des réglementations d'hygiène des hôpitaux, même si les points de collecte et de livraison sont les mêmes dans les six établissements.

La collecte du linge sale est réalisée à l'aide de deux véhicules dédiés grâce à des sacs de différentes couleurs entreposés dans des chariots. Les chauffeurs des véhicules effectuent plusieurs tournées par jour afin de collecter des chariots pleins et de déposer des vides. Généralement, les points de collectes associent plusieurs services, et le personnel de soin s'occupe lui même de descendre les sacs de linge sale à ces points.

Les tournées du linge propre fonctionnent sur le même principe que celles du linge sale excepté le fait qu'elles consistent à livrer du linge au lieu de le collecter. Actuellement, trois véhicules sont dédiés pour cette livraison dans plus de 180 points différents en effectuant trois à quatre tournées par jour chacun. Le transport du linge s'effectue dans des armoires. Celles-ci peuvent être dédiées à un service particulier ou regrouper plusieurs services. La blanchisserie fonctionne à flux tiré, la plupart des armoires sont préparées le jour même. Il n'y a pas assez d'armoires préparées en avance pour que toutes les tournées commencent le matin au même moment.

1.2.3 L'UCPA

L'Unité Centrale de Production Alimentaire (UCPA) assure toute la production et la livraison des plateaux repas pour le midi et le soir (4500 repas par jour). Actuellement, l'UCPA dispose de quatre véhicules identiques et d'une camionnette frigorifique. Cette dernière est utilisée pour livrer uniquement les selfs et internats. Les quatre véhicules effectuent deux à trois tournées par jour avec une seule personne. Etant donné que l'UCPA est située à Trousseau, les repas à destination de cet hôpital ne nécessitent pas de transports par véhicule. La livraison est directement prise en charge par l'équipe de manutention de Trousseau. L'une des contraintes fortes est celle restreignant les horaires de livraison des repas dans chaque service. Les repas sont transportés dans des chariots frigorifiques à eau

qui sont caractérisés par leur autonomie (les repas ne peuvent plus être transportés au-delà d'un certain temps). Enfin, lors de la livraison, les chariots vides du repas précédent doivent être récupérés. Ainsi, les chariots des repas du midi seront ramassés à la livraison des chariots du repas le soir et inversement, les chariots des repas du soir seront ramassés à la livraison des repas du lendemain midi.

Comme pour le flux du linge propre, il faut considérer des contraintes liées à la production des repas et au chargement des repas dans les chariots. En effet, l'UCPA ne peut pas fournir tous les repas à livrer pour la journée en un seul coup, mais successivement dans la journée. Enfin, l'un des projets de cette logistique est de changer son parc de chariots et de véhicules. Ce changement modifierait les temps d'autonomie et autoriserait éventuellement une mutualisation avec d'autres flux, sauf si le transport des chariots nécessite des véhicules frigorifiques.

1.2.4 La pharmacie

La logistique pharmaceutique livre l'ensemble des services du CHRU en médicaments, solutés, dispositifs médicaux, etc. Actuellement, six tournées par jour à l'aide de deux véhicules sont prévues pour assurer ces livraisons. Comme pour l'UCPA, la pharmacie se situe à Trousseau et les livraisons à destination des services de Trousseau sont prises en charge par l'équipe de manutention. Les produits sont transportés essentiellement dans des chariots et parfois par palettes (équivalent à deux chariots en surface). Chaque chariot est destiné à un service. Le livreur dépose chaque chariot aux services et récupère les chariots vides de la tournée précédente. Certains services restreignent fortement l'horaire de livraison de manière à s'assurer qu'une personne du service sera présente pour la réception et qu'aucune pénurie de médicaments ne surviendra. Enfin, la pharmacie requiert un temps de préparation de chariots. Elle prépare les chariots 2h00 avant la livraison, et la veille pour les tournées du matin, permettant ainsi aux services d'effectuer des commandes de dernière minute.

1.2.5 La stérilisation

La stérilisation de Trousseau s'occupe du matériel médical à stériliser (essentiellement pour les blocs opératoires). Actuellement, les produits sont livrés en passant par le flux pharmaceutique, il fonctionne donc sur le même principe. Le transport de ces produits s'effectue dans des bacs qui sont placés dans des armoires. Les trois points de livraisons concernés sont l'Unité de Soins et de Cardiologie Interventionnelle (USCI), la réanimation médicale et l'Oncologie de Bretonneau. Ces points doivent être livrés plusieurs fois par semaine avec un horaire de livraison par service contraint par une fenêtre de temps. Les produits à stériliser sont collectés lors des livraisons et conduits à Trousseau.

1.2.6 La Logistique Hôtelière

La logistique hôtelière livre tous les produits consommés par le CHU (650 références) autres que les produits pharmaceutiques. Ces livraisons sont assurées par deux véhicules

effectuant chacun deux longues tournées par jour. Le transport des produits s'effectue toujours à l'aide de chariots, cependant ces derniers ne sont pas simplement déposés dans les services puisque les produits hôteliers doivent être rangés par le livreur dans les zones de stockage. Le temps de livraison n'est donc pas à négliger. Pour essayer de gagner du temps, la logistique hôtelière a décidé d'affecter 2 personnes par tournée. Comme pour la pharmacie, les chariots vides doivent être ramenés, et les chariots à destination des services de Trousseau sont livrés directement par l'équipe de manutention. La fréquence de livraison est pratiquement la même pour tous les services, elle est d'une seule fois par semaine.

1.2.7 La salubrité

Le flux Salubrité assure l'évacuation de nombreux types de déchets dont les plus importants sont les Déchets Ménagers et Assimilé (DMA) et les Déchets d'Activités de Soins à Risques Infectieux (DASRI) des services par des chariots spécifiques. Actuellement, une benne collecte les DMA et un véhicule spécifique s'occupe de collecter les DASRI, uniquement sur Bretonneau et Trousseau, pour ensuite les emmener sur un site éloigné dédié au traitement de ce type de déchets. Enfin, une équipe salubrité aide à organiser ces collectes en se synchronisant avec les autres tournées pour regrouper les chariots de certains hôpitaux sur certains points stratégiques et moins nombreux. Cette équipe utilise soit un véhicule pour les collectes hors Bretonneau, soit un fenwick extérieur pour les collectes de Bretonneau. Les points stratégiques sont les quais d'un bâtiment de Bretonneau et Trousseau. Enfin, aucune mutualisation avec un autre type de flux n'est envisageable.

1.2.8 Les services à livrer ou à collecter

Les services de soins sont également un élément clé du système, puisqu'ils font office de clients d'un point de vue d'un problème de tournées de véhicules. Chaque service émet des besoins en collecte ou en livraison de différents types de produits. Pour certains types de produits, l'horaire de livraison ou même de ramassage est important. Enfin, il y a également par type de produits une notion de variabilité des quantités (demande par jour, augmentation continue de la quantité de linge sale, etc.), et une notion de fréquence de livraison pour certains flux (une fois par jour, une fois par semaine, etc.).

Les demandes des services en produits sont donc assurées par les flux décrits précédemment, qui doivent traiter toutes les demandes en temps et en heure aux points de livraison ou de ramassage convenus. Ces points sont importants, ils définissent implicitement les temps de trajet par leur localisation géographique et leur accessibilité et les temps de livraison par des contraintes de livraison ou de ramassage. L'accessibilité est définie par l'ensemble des obstacles structurels. Ces derniers sont fortement liés à l'étage des points et par les différents ascenseurs à emprunter, avec leur fréquentation et leur capacité (2 chariots uniquement). Les durées de livraison sont influencées par deux facteurs : la quantité de produits à livrer ou à ramasser et les procédés (produits à ranger, chariots à déposer, trier ou non le linge, etc.) qui peuvent aussi dépendre des points à livrer ou à collecter. Notons que par moments, nous pourrons nous permettre de raisonner par groupement de services plutôt que par service.

Les services sont répartis dans les six hôpitaux. Chaque hôpital possède un unique quai pour le chargement et le déchargement des véhicules hormis l'hôpital Bretonneau qui est composé de plusieurs pavillons dont la plupart dispose d'un quai. Ces quais peuvent offrir plusieurs places et être classés en deux types. Le premier type appartient à la catégorie des quais niveleurs qui permettent de charger et décharger les chariots très rapidement. Le deuxième type de quai correspond à une simple place de véhicule qui nécessite un hayon élévateur pour charger et décharger. Même si tous les véhicules du CHRU possèdent des hayons élévateurs, la priorité de transbordement est donnée au premier type de quai puisque l'opération du deuxième type de quai nécessite plus de temps. Enfin, le nombre de quais est limité par hôpital, en particulier pour Clocheville où cette contrainte est majeure. Situé en centre ville, cet hôpital connaît actuellement des difficultés de succession de véhicules au quai (attente importante de libération d'une des deux places, retards sur les tournées) qui génèrent quelques conflits.

1.2.9 Le cas Bretonneau

L'hôpital Bretonneau est le plus grand des hôpitaux du CHRU de Tours par sa taille et par son activité. Bretonneau est constitué de nombreux bâtiments au travers desquels la circulation est malaisée et est rapidement perturbée dès qu'un camion stationne trop longtemps pour décharger. Actuellement, les chauffeurs doivent monter dans les bâtiments pour effectuer eux-mêmes les livraisons dans chaque service. En plus de gêner la circulation, cela induit également des retards de livraisons lorsque deux camions de flux différents se succèdent trop rapidement et cela peut, par effet domino, perturber l'ensemble des tournées ainsi que le fonctionnement des services.

C'est dans ce contexte que le CHRU de Tours a débuté une réflexion sur la restructuration de la logistique dans Bretonneau. Cette restructuration prévoit la création d'une équipe de manutentionnaires et l'utilisation d'un grand quai de déchargement pour faciliter le stationnement des camions et en limiter le temps, et ainsi fluidifier au maximum la circulation dans cet hôpital. Ces manutentionnaires prendront en charge les livraisons dans les services des bâtiments en utilisant autant que possible des fenwicks et des couloirs souterrains. Cependant après une étude de terrain, il est apparu que seul un sous-ensemble de bâtiments de Bretonneau peut être livré par des manutentionnaires. Ce sous-ensemble correspond aux cinq plus grands bâtiments de Bretonneau. La figure 1.3 représente un plan de Bretonneau avec une indication sur les bâtiments pouvant être livrés par les manutentionnaires avec éventuellement un fenwick, les bâtiments livrable uniquement par véhicules, les couloirs souterrains et le quai de transbordement des chariots à destination des bâtiments et services qui seront livrés par les manutentionnaires.

L'équipe manutention aura pour objectif d'assurer la plupart des tournées intra Bretonneau. Le nombre de manutentionnaires est à déterminer comme leurs horaires de travail. Il est prévu que lorsqu'un véhicule arrive sur le quai de Bretonneau, le chauffeur décharge seul le véhicule, charge les chariots éventuellement à récupérer puis reparte. Les chariots sont ensuite récupérés et livrés par les manutentionnaires soit à pieds par lots de deux, soit

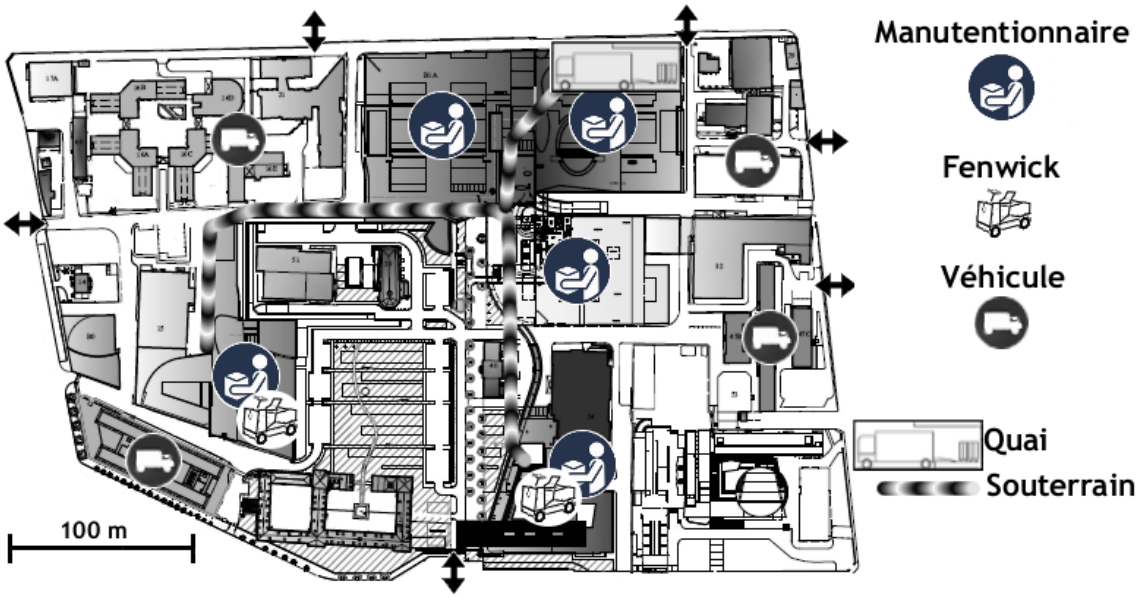


FIG. 1.3 – Plan de Bretonneau et modes de livraison par bâtiment

par fenwicks par lots de cinq. Enfin, il faut noter que tous les types de chariots peuvent s'attacher entre eux pour le transport.

Ce projet étant encore à l'étape de réflexion, la direction logistique du CHRU souhaite envisager plusieurs cas. Comme par exemple, le cas où l'équipe de manutention ne prend pas en charge certains types de flux, à savoir la salubrité ou le linge sale dans Bretonneau, ces derniers étant gérés par l'équipe salubrité. Le cas du "futur Bretonneau" (suite d'une longue série de rénovations de bâtiments dans Bretonneau) pourrait être aussi envisagé avec la construction d'un dernier grand bâtiment.

Enfin, la création d'une équipe de manutentionnaires apporterait d'autres avantages car elle pourrait réaliser quelques tâches supplémentaires. Certaines de ces tâches ont pour objectif d'alléger les transports effectués par les services de soins. Les tâches supplémentaires qui peuvent être considérées sont les suivantes :

- Les caisses roses : ce sont ces bacs de médicaments transportés à l'aide de chariots qui peuvent être vus comme un flux interne à Bretonneau. Ils ont pour origine la Pharmacie à Usage Intérieur (PUI) de Bretonneau et sont à destination de tous les services de soins de l'hôpital.
- Transport à la demande intra-Bretonneau : certaines des demandes de transports ponctuels du Logicourses doivent être réalisées entre services de Bretonneau. Elles pourraient être réalisées par l'équipe de manutention.
- Réception des bidons de solutions acides : les palettes des bidons de solutions acides (quantité importante d'une solution pour le fonctionnement de certaines machines), sont transportées dans le service par le coursier du service d'hémodialyse (1/2h à 3/4h de temps de traitement). Cette tâche pourrait éventuellement faire intervenir

l'équipe de manutention.
- enfin, il serait envisageable que l'équipe de manutention apporte son aide au service du Logicourses. Le Logicourses est un service basé à Bretonneau, en charge de tous les transports à la demande.

1.3 Centrale des ambulanciers et SAMU

Les transports de patients concernent deux services différents au CHRU : la Centrale des Ambulanciers pour essentiellement les transports internes du CHRU, et le SAMU pour les transports nécessitant une aide médicale urgente. Le SAMU n'a aucun ambulancier d'affecté, il doit à chaque fois faire une demande à la Centrale des Ambulanciers.

1.3.1 La Centrale des Ambulanciers

La Centrale des Ambulanciers a pour objectif d'assurer tous les transports internes des patients qui nécessitent un véhicule mais aussi de répondre aux demandes d'ambulanciers émanant du SAMU. Les demandes de transports sont émises par les différents services du CHRU de Tours. Suite à ces demandes, ce sont les régulateurs de la centrale qui décident quelle équipe ambulancière effectue quel transport. Seuls 30% des transports sont connus en début de matinée pour la journée même, les autres demandes de transports arrivent en temps réel.

1.3.1.1 Les ressources

La Centrale des Ambulanciers est composée de 61 personnes dont 55 ambulanciers. Le nombre de transports est en moyenne de 50 000 par an soit environ 140 par jour de semaine. Ces transports peuvent être effectués par trois types de véhicules : des Véhicule Sanitaire Léger (VSL) au nombre de 4, des ambulances classiques, dites de type C, au nombre de 15, ou des ambulances dites de type A pour des transports médicalisés au nombre de 2. Les VSL sont conduits par un seul ambulancier et peuvent transporter plusieurs patients à la fois en position assise. Les ambulances (avec deux ambulanciers) sont réservées au transport d'un seul patient en position allongée ou demi-assise ou assise nécessitant une surveillance particulière (sous oxygène, perfusé,...). L'ambulance est dite médicalisée s'il y a présence d'un médecin d'un service ou du SAMU avec éventuellement du matériel embarqué spécifique. Seuls les véhicules de catégorie A sont médicalisables. Lors d'un transport médicalisé par un médecin d'un service, la même ambulance doit ramener le médecin dans son service. Cependant, pour des raisons d'économie et de gain de temps, elle peut effectuer le retour en transportant un autre patient, même avec la présence du médecin qu'il faut ramener.

Parmi les 55 postes ambulanciers, dix sont réservés à la formation de deux équipes pour assurer les transports de nuit. Les 45 autres postes servent donc à constituer les équipes de jour. Il y a au total 13 équipes d'ambulanciers théoriques sans compter les VSL. Mais en pratique, le nombre d'équipes présentes simultanément varie entre 10 et 12. Les postes

pour VSL peuvent être considérés comme indépendants, puisqu'ils sont occupés par des ambulanciers qui ne sont plus aptes à brancarder des patients. Ces ambulanciers sont donc obligés d'effectuer du VSL. Le nombre d'ambulanciers dans ce cas est suffisamment important pour assurer tous les transports de patients en VSL sans problème. C'est pourquoi seuls les transports en ambulance sont considérés dans cette étude. Les caractéristiques des 13 équipes de jour sont fournies dans le tableau 1.1 (deux équipes I8 et I9 signalées par l'astérisque effectuent uniquement des transports pour l'imagerie de Bretonneau).

Départ	**Horaires**	**Dénomination**
Trousseau	6h00-13h30	T6
	7h00-14h30	T7
	9h30-17h00	T9
	12h30-20h00	T1
	13h30-21h00	T2
Bretonneau	7h00-14h30	B7
	8h00-15h30	B8
	8h30-16h00	I8∗
	9h30-17h00	I9∗
	9h30-17h00	B9
	12h00-19h30	B1
	12h00-19h30	B1
	13h30-21h00	B2

TAB. 1.1 – Equipes Ambulancières

Toutes les équipes prennent au début de leur service des ambulances de type C, car 90% des transports s'effectuent avec ce type de véhicule. Elles pourront être amenées à changer de véhicule en fonction des demandes traitées. Les horaires sont fixes, et le planning du personnel de la centrale est prévu au minimum 2 à 4 semaines à l'avance.

En fonction de la charge de travail sur une journée, la Centrale des Ambulanciers ne possède pas toujours assez de moyens pour répondre à toutes les demandes. Ils sous-traitent alors une partie de l'activité à des ambulances privées lorsqu'elles sont disponibles. Toutes les ambulances privées ne coûtent pas le même prix. Le régulateur privilégie les entreprises les moins onéreuses. Le coût des ambulances privées est composé d'un forfait auquel vient s'additionner une tarification au kilométrage si le trajet parcouru par le patient dépasse les 5 km. En effet seule la distance parcourue avec le patient est prise en compte, quelle que soit la localisation de l'entreprise.

Pour traiter toutes les demandes de transports, les régulateurs ont comme outil de travail un logiciel, nommé PTAH[1], permettant d'organiser les transports. Pour cela, deux postes d'ordinateurs sont disponibles pour la régulation. Chaque poste possède une application pour réguler tous les transports. Le logiciel PTAH est directement lié à un transmetteur de données relié aux différents véhicules. Ainsi, chaque équipe possède un boîtier leur permettant de visualiser, d'accepter ou de refuser les demandes de transports, mais aussi de

[1]Logiciel de gestion et d'optimisation des transports en milieu hospitalier, développé par Géo Soft Aquitaine

communiquer par radio avec un régulateur.

Le rôle du régulateur est donc très important. C'est à lui d'affecter les équipes aux différentes demandes de transports suivant la disponibilité des équipes d'ambulanciers, leurs situations géographiques, les priorités des demandes, le type de véhicule nécessaire, les transports à venir, etc.. C'est aussi lui qui vérifie que le transport peut être assuré par une équipe ou qui décide de faire appel au privé si nécessaire. Il peut aussi décider de reporter le déplacement du patient et devra dans ce cas prévenir les services concernés. Le régulateur garde sous les yeux une feuille des véhicules et équipes du jour disponibles avec leurs horaires. Les écrans lui permettent donc de prendre toutes ces décisions, mais c'est aussi à lui de vérifier et de garder en tête la localisation en temps réel des équipes.

1.3.1.2 Les demandes de transports internes

Les demandes de transports internes au CHRU sont émises par les différents services. Ces transports correspondent à la prise en charge d'un transfert de patient d'un point A à un point B (analyses à faire dans un autre service, transfert de service, etc.). Même si le patient doit faire un aller-retour, la Centrale des Ambulanciers traite ce type de transport comme deux transports différents. Cette différenciation permet à l'équipe assurant le transport aller de ne pas attendre inutilement, car généralement la différence de temps entre l'entrée et la sortie du patient dans le service destination est assez importante. Cependant, aucune heure de retour n'est connue à l'avance. Une équipe ambulancière dépose le patient dans le service à l'heure convenue puis repart. Le régulateur sait que le patient est arrivé et qu'il faudra prévoir son retour lorsque le service accueillant l'aura décidé.

Lorsqu'un service procède à une demande de transport d'un patient, il effectue cette demande par l'informatique grâce au logiciel PTAH. Cette demande consiste à remplir un formulaire contenant les caractéristiques du transport demandé :

- le type de transport (aller simple, aller-retour, aller médicalisé, aller-retour médicalisé, décès),
- mode de transport (brancard, fauteuil ou marche),
- isolement ou non (si le patient est contagieux),
- précautions à prendre (perfusion, oxygène, dossier à prendre,...),
- information sur le lieu de départ du patient,
- date et horaire du rendez-vous à son service de destination,
- et d'autres informations, comme le nom du patient, le type d'examen, etc.

Dans le cas d'un isolement (personnes contagieuses), le véhicule doit subir après le transport une désinfection, qui prend au total une heure d'immobilisation et doit se réaliser soit à Bretonneau soit à Trousseau. Deux cas de figures peuvent arriver :

- l'équipe ambulancière change de véhicule pour réaliser d'autres transports et reviendra désinfecter le véhicule ultérieurement,
- l'équipe ambulancière garde ce véhicule et s'occupe donc de la désinfection immédiatement après le transport en isolement.

Seules, la date et l'heure auxquelles le patient doit arriver au service destination sont données. C'est le logiciel PTAH qui calcule l'heure de départ du patient de son service d'origine en fonction du trajet et des heures de pointe. Enfin, un service peut annuler une demande de transport d'un patient jusqu'à 30 minutes avant l'heure de départ prévue.

Il faut noter que le service des urgences demande des transports à partir de 14h avec un pic à 16h afin de libérer leurs chambres. Il y a aussi de nombreux retours de consultations vers 12h30 suite aux rendez-vous de la matinée.

Enfin, la durée de prise en charge du patient hors véhicule varie selon son point de départ et d'arrivée. De plus, le temps du trajet est aussi variable.

1.3.1.3 Les demandes d'ambulanciers émanant du SAMU

Le SAMU du CHRU de Tours ne dispose pas d'ambulanciers, il doit donc en faire la demande à la centrale. La centrale doit alors libérer des ambulanciers pour effectuer des transports en commun avec le SAMU. En effet, dans certains cas, le SAMU envoie une équipe SMUR qui requiert entre 1 et 2 ambulanciers pour aider au brancardage et conduire l'ambulance A du SAMU. Le nombre d'ambulanciers qui doit être envoyé dépend normalement du type d'intervention SAMU, cependant, pour des raisons pratiques, les ambulanciers sont toujours envoyés par deux.

Ce type de demande est peu prévisible et le délai de réponse varie entre une dizaine de minutes et une heure. Il n'est connu que très peu de temps à l'avance et il est difficile de prévoir le retour des ambulanciers. Ce transport peut aussi bien avoir lieu depuis le point d'arrivée de l'hélicoptère à l'hôpital Trousseau (500 mètres seulement), que de cet hôpital à un hôpital hors département. Cette demande est donc à caractère fortement aléatoire. La centrale ambulancière est obligée de satisfaire ces demandes car six postes ambulanciers sont budgétés par le SAMU. En théorie la centrale ne peut pas faire appel aux ambulances privées pour intervenir avec le SAMU.

1.3.2 Le SAMU

Le SAMU et le Service Départemental d'Incendie et de Secours (SDIS, Pompiers) sont dans le même bâtiment appelé le CETRA. Ce centre reçoit tous les appels de détresse du département, aussi bien le 15 que le 18 ou le 112. L'objectif de ce regroupement est d'améliorer la qualité des échanges en permettant la diffusion immédiate d'informations entre les différents services, de réguler tous les appels de secours, d'apporter une réponse graduée et adaptée en fonction de la nature et du degré d'urgence, de faciliter le déclenchement des secours et de mutualiser les secours. Il existe donc toute une procédure pour traiter chaque appel avec envoi d'un certain type de secours suivant le type de détresse. Les secours qui peuvent être envoyés sont soit les pompiers, soit les SMUR, soit les médecins généralistes de garde, soit les ambulances privées. Le Cetra reçoit plus de 10 000 appels par mois dont la moitié nécessite un envoi de véhicule.

1.3.2.1 Gestion des appels

Tous les appels sont gérés par des opérateurs appartenant aussi bien aux pompiers qu'au SAMU, à l'aide d'un équipement informatique important. Ils sont divisés en trois parties : le front office, les pompiers par le SDIS et le SAMU constitué de permanenciers et médecins. A chaque réception d'un appel, une fiche informatique, nommée "affaire", est créée. L'affaire est généralement créée par le front office et peut être communiquée à toutes les autres personnes du centre d'appel grâce au logiciel. Ces affaires servent de fiche de suivi avec toutes les informations qui conviennent (adresse, état de la victime,...), un code couleur pour le degré d'urgence, les secours affectés et encore bien d'autres champs textes pour le suivi correct de l'appel (bilan santé, les décisions prises, ...). L'affaire est généralement clôturée par le SDIS ou le SAMU suivant le cas. Nous nous intéressons uniquement aux appels impliquant une intervention du SAMU et un transport de patient.

Tous les appels passent par le front office. Cette étape permet de trier les appels et de compiler un ensemble d'informations préliminaires. A partir de ces informations, des premiers secours peuvent être envoyés, comme des Véhicules de Secours et d'Assistance aux Victimes (VSAV) et les affaires sont transmises au SAMU avec un code prioritaire.

1.3.2.2 Le SAMU

Le SAMU est donc constitué de permanenciers et de médecins régulateurs. Ce sont eux qui assurent le suivi des opérations jusqu'à la clôture des affaires. A la réception des affaires, les permanenciers ont pour but de les traiter par ordre de priorité. Plusieurs cas peuvent se produire :

- sachant qu'un VSAV a été envoyé, le permanencier attend un bilan médical qui sera donné par radio par un pompier et décidera à ce moment là d'envoyer ou non un autre type de secours ou ordonnera aux pompiers d'amener la victime dans un hôpital,
- si le cas est grave, le permanencier envoie une équipe SMUR immédiatement,
- si le cas est moins grave, mais que le patient a besoin d'être transporté dans un établissement de soins, il enverra soit un VSAV soit une ambulance privée pour tous les lieux privés.
- si le cas est vraiment mineur, il peut faire appel à des médecins généralistes de garde,
- enfin, pour certains appels, il arrive qu'un simple conseil suffise pour régler l'affaire.

L'envoi des moyens de secours doit être pris en concertation avec le médecin régulateur. C'est aussi à eux de vérifier la disponibilité des secours en particulier pour les SMUR.

Dans le cas d'un rapatriement de la victime vers un établissement de santé, le choix de l'hôpital est soit imposé par la maladie du patient (s'il a des problèmes au coeur, il sera envoyé à Trousseau qui a une spécialité cardio-vasculaire) soit laissé au choix au patient entre une clinique ou un hôpital public. L'établissement de destination choisi dépend aussi de la localisation géographique.

Enfin, il existe un dernier type d'urgence qui ne concerne que le SAMU : les urgences secondaires. Pour celles-ci, le SAMU est appelé directement sur sa ligne privée. Ces ur-

gences secondaires consistent à transporter tout patient d'un établissement de soins à un autre en extrême urgence avec généralement un matériel médical spécifique. Ces urgences peuvent avoir donc recours au SMUR.

1.3.2.3 Les SMUR

Un SMUR est une équipe de deux personnes compétentes dans les soins d'urgences : un médecin et un infirmier avec un matériel médical conséquent. Il y a en permanence deux équipes à Tours, une à Chinon, une à Loche et une à Amboise (à noter qu'il existe aussi un SMUR particulier dit pédiatrique pour uniquement les enfants de très bas âge). Ces équipes sont prêtes à partir à tout moment à la demande des permanenciers et médecins régulateurs. Plusieurs véhicules sont à leur disposition : des VSL, des ambulances et même un hélicoptère. Ces véhicules sont lourdement équipés en matériel médical de secours. Les SMUR effectuent en moyenne 15 interventions par jour.

Suivant le type de transport, il existe deux types de SMUR :
- Primaire lorsqu'un appel nécessite l'envoi d'un SMUR immédiat sur un lieu quelconque, le SMUR part avec un véhicule léger sur les lieux, il sera rejoint par une ambulance privée ou un VSAV par la suite pour le rapatriement du patient avec l'équipe SMUR. Le véhicule léger sera alors ramené par un pompier ou un ambulancier privé suivant l'envoi du deuxième véhicule. Cependant l'appel d'un VSAV ou d'une ambulance privée induit un coût qui pourrait être évité si le SAMU possèdait des ambulanciers pour les transports primaires.
- Secondaire : dans ce cas l'équipe SMUR part avec une ambulance appartenant au SAMU mais conduite par un ambulancier de la centrale. Ce processus engendre un disfonctionnement au sein de la centrale ambulancière car elle doit libérer un ambulancier dans un bref délai.

Enfin, il faut noter que 6 postes d'ambulanciers sont budgétés par le SAMU afin d'avoir théoriquement un ambulancier disponible 24h sur 24. Cependant, pour éviter que les ambulanciers ne soient trop souvent dans l'attente des départs SMUR et donc à ne rien faire, ils ont été transférés à la centrale. Ainsi, la centrale est tenue de répondre au SAMU lors de sa demande d'ambulanciers, pour des départs de SMUR de type secondaire uniquement.

1.4 Deux problématiques au CHRU de Tours

Cette thèse aborde donc deux problématiques : le transport de biens par l'ensemble des logistiques du CHRU de Tours et le transport de patients par la Centrale des Ambulanciers (CA) ou le SAMU. Cette section introduit ces deux problématiques de manière générale.

1.4.1 Réorganisation de la logistique

La problématique de la logistique s'inscrit dans le cadre d'une étude sur la réorganisation de la logistique hospitalière du CHRU de Tours. Cette réorganisation prévoit la

re-planification des tournées de véhicules entre les différents hôpitaux, la mutualisation de transports, dans la mesure du possible et la création d'une équipe de manutentionnaires dans l'hôpital très étendu qui est Bretonneau.

L'objectif de cette étude est donc de dimensionner et de mettre en place cette équipe de manutention et implique de revoir également la planification des tournées logistiques et les besoins en chauffeurs. En effet, les tournées entre les hôpitaux seront fortement connectées aux tournées des manutentionnaires et il n'est pas possible de négliger les livraisons et les collectes des autres hôpitaux. De plus, le CHRU impose que le futur nombre de manutentionnaires et de chauffeurs soit égal au nombre actuel de chauffeurs (effectif constant). Enfin, l'étude permettra aussi de tester différentes mutualisations possibles des ressources entre les différentes logistiques, contrairement à aujourd'hui où chaque logistique est complètement indépendante et possède ses propres véhicules et ses propres chauffeurs.

Le premier niveau du problème correspond aux tournées des véhicules entre les hôpitaux et les dépôts. Certains produits peuvent être transportés dans un même véhicule alors que d'autres doivent absolument être séparés. Le temps de chargement d'un camion n'est pas négligeable et doit être pris en compte, il dépend de la quantité de chariots à emporter. La flotte de véhicules n'est pas homogène, en particulier les capacités sont différentes. La capacité d'un véhicule est définie par un nombre de chariots. Les véhicules ne peuvent pas tous décharger et charger leurs cargaisons au même moment, il y a un nombre de places limité par quai.

Le deuxième niveau du problème se situe à Bretonneau, les chariots doivent être pris en charge par l'équipe de manutention qui devra les emmener dans les bâtiments. Pour effectuer les livraisons, l'équipe peut se déplacer à pied ou utiliser des fenwicks. L'utilisation de fenwicks souterrains est obligatoire pour relier certains bâtiments, les autres bâtiments étant livrables à pied. Un transport en fenwick permet de tracter un nombre maximum donné de chariots, et un transport pédestre présente la même caractéristique, dans les deux cas cela mobilise un unique manutentionnaire et des chariots de tout type peuvent être mélangés.

De manière générale, ces deux niveaux de problèmes sont interconnectés puisqu'ils sont reliés par le quai de transbordements de Bretonneau qui est, du point vue du premier niveau, un point de livraison des tournées inter-hôpitaux et du point de vue du second niveau un point de départ des tournées internes à Bretonneau. Une autre contrainte forte liant ces deux problèmes est que l'équipe de manutentionnaires devra être constituée à partir du pool de chauffeurs existant actuellement. L'objectif principal est de livrer en temps et en heure tous les services et en respectant l'ensemble des différentes contraintes (autonomie des chariots, nombre de places par quai, préparation de chariots, etc.).

1.4.2 CA et SAMU

Plusieurs difficultés apparaissent dans la gestion des transports de patients. Ces difficultés sont principalement liées à la coordination entre le SAMU et la CA. D'un côté, des

demandes urgentes pour le SAMU sont à traiter le plus rapidement possible. D'un autre côté, des demandes de transports arrivent en temps réel et sont à planifier de manière à diminuer le temps d'attente des patients mais aussi à faire appel au privé le moins souvent possible. En plus de cette planification, des demandes inopinées d'ambulanciers sont à gérer. De plus, le SAMU ne possède pas d'ambulancier dans le cas d'intervention primaire et ne peut pas en demander à la CA. Cette carence volontaire provoque des appels aux pompiers ou au privé induisant un coût pour le SAMU non négligeable. Quelque soit le service, CA ou SAMU, deux critères sont importants : la qualité du service (temps de réponse, durée d'attente du patient, etc.) et les coûts engendrés (appels au privé, appels aux VSAV, frais kilométriques, etc.).

Deux sous problématiques peuvent être dégagées et éventuellement résolues par des outils de la RO. La première s'adresse principalement à la CA, et plus précisément aux régulateurs pour la planification des transports en temps réel. La deuxième problématique concerne la répartition du nombre d'ambulanciers entre ces deux services.

1.4.2.1 Planification de transport de patient en temps réel

Toutes les demandes de transports de patients sont donc traitées par le ou les régulateurs de la centrale. Le rôle du régulateur est de choisir la meilleure affectation des équipes (ou des véhicules) aux différentes demandes de transports suivant la disponibilité des véhicules, les contraintes d'horaires, les situations géographiques, le type de véhicule nécessaire et les autres transports à planifier. Il doit aussi répondre rapidement aux demandes d'ambulanciers pour le SAMU. C'est aussi à lui de décider de faire appel aux ambulances privées si nécessaire.

Le problème résolu chaque jour par les régulateurs correspond à un problème de transport à la demande avec des contraintes spécifiques au milieu hospitalier. Etant donné les transports à effectuer dans une journée, l'objectif est de trouver les affectations des véhicules aux demandes et de définir les trajets des véhicules de manière à minimiser les coûts de transports (appel aux ambulances privées, frais kilométriques,...) tout en assurant une qualité de transport pour le patient, qui doit attendre le moins possible l'ambulance. De plus, la nature du problème est dynamique, les demandes de transports arrivent en temps réel avec en plus les demandes du SAMU. Les tournées de véhicules doivent être calculées en fonction des données connues à un instant t (localisation des ambulances, transports à venir, etc.) et devront être recalculées à chaque nouvel événement.

1.4.2.2 Répartition du nombre d'ambulanciers entre la CA et le SAMU

Depuis le début, tous les ambulanciers sont gérés par la CA. Ce choix découle de l'idée qu'un ambulancier affecté au SAMU risquerait de passer trop de temps à ne rien faire en attendant des demandes non prévisibles de transport secondaire ou primaire. Cependant, si quelques ambulanciers étaient affectés au SAMU pour répondre à ces demandes, le coût d'appel au privé ou aux pompiers serait fortement diminué. De plus, le SAMU perturberait beaucoup moins la CA avec ses demandes urgentes d'ambulanciers. Néanmoins, comme

l'idée d'engager de nouveaux ambulanciers par le CHRU est difficilement concevable, les ambulanciers affectés en plus au SAMU seraient des ambulanciers en moins à la CA. Le premier impact pour la CA serait inévitablement une augmentation du nombre d'appels au privé, et donc un coût plus élevé, même si la CA serait moins perturbée par les demandes d'ambulanciers du SAMU. L'objectif de ce problème est de trouver un bon compromis entre l'augmentation des coûts pour la CA et la diminution des coûts pour le SAMU.

Le dimensionnement du nombre des ambulanciers au SAMU et à la CA n'est pas simple. D'une part, cela ne se résume pas à déterminer le nombre d'ambulanciers mais aussi leurs horaires de travail, leurs interventions possibles pour le SAMU (primaire et/ou secondaire), les nouvelles compositions d'équipes pour la CA, etc. D'autre part, l'aspect aléatoire des demandes au SAMU mais aussi à la CA jouent un grand rôle. Enfin, la comparaison entre deux solutions doit s'effectuer en termes de coût pour le CHRU mais aussi de qualité des transports.

1.5 Conclusion

Les travaux de recherche effectués durant cette thèse sont donc menés en collaboration avec le CHRU de Tours. Les services sur lesquels notre étude a principalement porté sont les services liés à la logistique, le SAMU et la Centrale des Ambulanciers. Les services de logistiques assurent l'approvisionnement des services de soins de chacun de ces hôpitaux en linge propre, en plateaux repas, en fournitures diverses, en médicaments, en dossiers patients papiers et en matériels stérilisés. Ils assurent également la collecte de déchets nécessitant des traitements particuliers et de linges sales. Ces flux de matière sont gérés séparément par la Blanchisserie, l'UCPA, la Logistique Hôtelière, la Pharmacie, les Archives, la Stérilisation, et la Salubrité. Pour améliorer leurs services, la direction de la logistique souhaite revoir leur organisation et mettre en place une nouvelle structuration de l'hôpital Bretonneau en termes de gestion de flux. La Centrale des Ambulanciers (CA) a deux objectifs. Le premier est d'assurer tous les transports internes des patients entre services de soins du CHRU de Tours. Le deuxième objectif est de répondre aux demandes d'ambulanciers qui émanent du SAMU. Le SAMU est chargé de gérer l'aide médicale urgente en passant par l'envoi de moyens de réanimations mobiles (SMUR), de VSAV ou d'ambulances privées. Les travaux de recherche dans cette thèse abordent deux problématiques : le transport de biens par l'ensemble des logistiques du CHRU de Tours et le transport de patients par la CA ou le SAMU. Les deux problématiques dégagées ont un point commun puisqu'elles sont toutes les deux liées à des problèmes de transports.

Première partie

Flux de matières

Chapitre 2

Position du problème de la logistique

Ce chapitre définit, positionne et délimite le problème général de la logistique au CHRU de Tours. Une première partie est consacrée à une description synthétique du problème auquel nous nous sommes intéressés, celui de l'optimisation des tournées et du dimensionnement des équipes. Une deuxième partie présente un état de l'art sur les problèmes étudiés dans la littérature proche de notre problématique.

2.1 Présentation générale

Après un rappel de la problématique de la logistique du CHRU de Tours, nous présentons le problème ainsi que tous les éléments à prendre en compte pour le résoudre.

2.1.1 Rappel de la problématique

La problématique du flux de matières du CHRU s'inscrit dans le cadre d'une étude sur la réorganisation de la logistique hospitalière (transports et livraisons). Cette réorganisation prévoit la re-planification des tournées de véhicules entre les différents hôpitaux, la mutualisation des transports, dans la mesure du possible et la création d'une équipe de manutentionnaires dans l'hôpital de grande taille Bretonneau.

Les services de soins de chacun des hôpitaux du CHRU de Tours doivent être approvisionnés en linge propre, en plateaux repas, en fournitures diverses, en médicaments, en dossiers patients papiers, en matériels stérilisés et sont centres de collecte de linge sale et de déchets nécessitant des traitements particuliers. Ces flux de matières sont gérés séparément par des services spécifiques, ce qui donne lieu à de nombreuses tournées de livraisons ou collectes manquant parfois de coordination. De plus, un des hôpitaux du CHRU (Bretonneau), est constitué de nombreux bâtiments au travers desquels la circulation est malaisée et est rapidement perturbée dès qu'un camion stationne trop longtemps pour décharger. Actuellement les chauffeurs doivent monter dans les services pour effectuer eux-mêmes les livraisons, ce qui les oblige à travailler en binômes. En plus de gêner la circulation, cela induit également des retards de livraison lorsque deux camions de flux différents se succèdent trop rapidement et cela peut, par effet domino, perturber l'ensemble des tournées

ainsi que le fonctionnement des services clients. De plus, certains hôpitaux possèdent trop peu de places sur les quais de déchargement, ce qui oblige parfois les chauffeurs à attendre qu'une place se libère pour pouvoir commencer à livrer.

C'est dans ce contexte qu'un projet de réorganisation de l'hôpital Bretonneau est actuellement en cours. Cette réorganisation prévoit l'utilisation d'un grand quai de déchargement pour faciliter le stationnement des camions et la mise en place d'une équipe de manutentionnaires pour limiter le temps de stationnement des camions et fluidifier au maximum la circulation dans cet hôpital. Ces manutentionnaires prendront en charge le transfert des chariots entre le quai de déchargement et les différents bâtiments et services de Bretonneau, en utilisant autant que possible des fenwicks et des couloirs souterrains. L'objectif de cette étude est donc de dimensionner et de mettre en place l'équipe de manutention et de revoir également la planification des tournées logistiques et les besoins en chauffeurs. En effet, les tournées entre les hôpitaux seront fortement connectées aux tournées des manutentionnaires, et il n'est pas possible de négliger les livraisons et les collectes des autres hôpitaux. De plus, le nombre futur de manutentionnaires et de chauffeurs doit être égal au nombre actuel de chauffeurs (effectif constant). Enfin, l'étude permettra aussi de tester différentes mutualisations possibles des ressources entre les différentes logistiques, contrairement à aujourd'hui où chaque logistique est complètement indépendante et possède ses propres véhicules et ses propres chauffeurs.

2.1.2 Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude est de dimensionner et de mettre en place une équipe de manutention au sein de l'hôpital Bretonneau, qui sera chargée d'assurer les livraisons dans les divers bâtiments et ainsi de faire gagner du temps aux chauffeurs. La résolution de ce problème est similaire à la résolution d'un problème de livraison (VRP ou *Vehicle Routing Problem*) inter-hôpitaux pour planifier les tournées des camions et d'un autre problème de livraison intra-hôpital de Bretonneau pour planifier le travail des manutentionnaires. Les flux matériels considérés dans cette étude sont les sept plus importants du CHRU :

- La logistique pharmaceutique : elle livre le CHRU en médicaments, solutés, dispositifs médicaux, etc. Les produits sont transportés dans des chariots. Chaque chariot est destiné à un service hospitalier, ou Unité Fonctionnelle (UF). Le livreur dépose chaque chariot aux UF et récupère les chariots vides de la tournée précédente.
- La logistique hôtelière : elle livre tous les produits consommés par le CHRU (650 références) autres que les produits pharmaceutiques. Le transport des produits est similaire à la logistique précédente, cependant les chariots ne sont pas simplement déposés aux UF puisque les produits hôteliers doivent être rangés par le livreur dans les zones de stockages.
- La blanchisserie : elle s'occupe de toute la lingerie du CHRU (plus de 15 tonnes de linge lavé par jour). Elle livre le linge propre dans des armoires et ramasse le linge sale déposé dans des sacs de différentes couleurs entreposés dans des chariots. La livraison et la collecte du linge ne s'effectuent pas par les mêmes véhicules à cause des réglementations d'hygiènes des hôpitaux.

- L'UCPA (Unité Centrale de Production Alimentaire) : ce service assure toute la production et la livraison des plateaux repas pour le midi et le soir (4500 repas par jour). L'une des contraintes fortes est celle restreignant les horaires de livraison des repas dans chaque service. Les repas sont transportés dans des chariots frigorifiques à eau qui sont caractérisés par leurs autonomies (les repas ne peuvent pas être transportés après un certain temps). Enfin, lors de la livraison, les chariots vides du repas précédent doivent être récupérés
- Les archives : ce service assure le stockage et le transport des dossiers patients. En particulier, il s'occupe de collecter les dossiers patients qui ne sont plus utilisés dans les services de soins et livre les dossiers patients demandés par le personnel des services de soins. Pour des raisons de confidentialité, les livraisons et collectes de dossiers s'effectuent par des armoires verrouillées entreposées dans des lieux sécurisés de stockage de proximités. Les dossiers patients sont donc soit entreposés aux archives soit dans les stockages de proximités des hôpitaux. De plus, les temps de livraison et de collecte ne sont pas négligeables.
- La salubrité : Ce service assure l'évacuation des Déchets Ménagers et Assimilés (DMA) et des Déchets des Activités de Soins à Risques Infectieux (DASRI) des UF par des chariots spécifiques.
- La stérilisation : ce service s'occupe du matériel médical à stériliser (essentiellement pour les blocs opératoires).

A chaque flux est associé un dépôt, qui correspond à sa zone de stockage (pour le flux pharmaceutique par exemple) ou de production (pour le flux de plateaux repas par exemple). Les dépôts sont répartis sur quatre sites géographiques (cf figure 2.1), quatre sont regroupés sur un même site nommé logipôle (logistique pharmaceutique, logistique hôtelière, stérilisation et UCPA), la salubrité se situe aux alentours de Bretonneau, les archives sont près du logipôle, tandis que la blanchisserie est à Tours Sud. Chaque flux a des véhicules attitrés, même si lors d'une tournée la cargaison de ces véhicules pourra être composée de plusieurs flux. Le dépôt d'un véhicule, c'est-à-dire son lieu de couchage est le dépôt de son flux propriétaire.

En résumé, les produits sont transportés dans des chariots de différents types ou armoires, pouvant être de tailles différentes mais tous attachables entre eux. Nous ne nous intéresserons donc qu'au nombre de chariots à livrer par type de produit. Chaque chariot a un point de livraison qui se situe dans un bâtiment dans Bretonneau ou dans un autre hôpital. Dans le cas de Bretonneau, nous définissons également un point de livraison de l'hôpital, qui est le quai de déchargement à partir duquel les chariots seront répartis dans les bâtiments. Chaque livraison ou collecte n'occupe pas le livreur de façon identique. Par exemple, il doit décharger lui-même les chariots de certains produits, comme ceux de la logistique hôtelière, tandis que d'autres sont pris en charge par le personnel soignant. Il repart du point de livraison avec autant de chariots vides qu'il a amené de chariots pleins, soit des chariots qu'il vient de vider, soit des chariots laissés lors d'un précédent passage. Pour la collecte du linge sale ou des déchets, la procédure est inverse, le livreur amène des chariots vides et prend des chariots non vides.

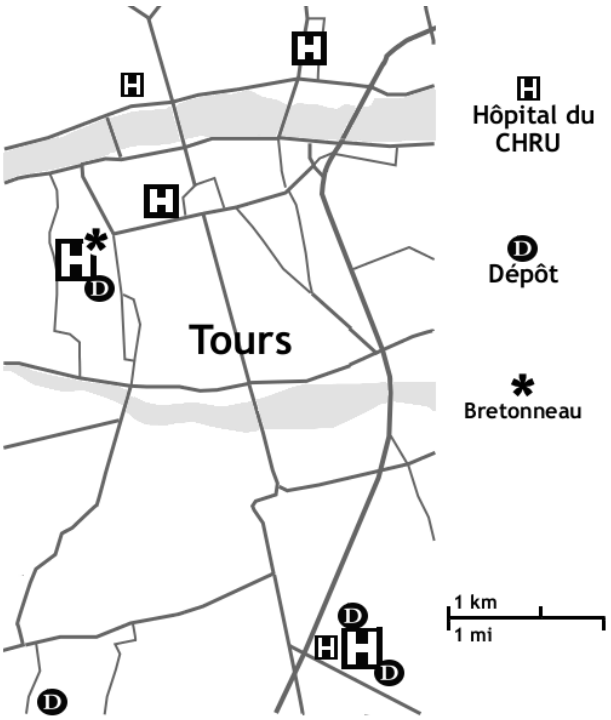


FIG. 2.1 – Carte de Tours

Le premier niveau du problème (inter-hôpitaux) correspond aux tournées des véhicules entre les hôpitaux et les dépôts. Certains produits peuvent être transportés dans le même véhicule alors que d'autres doivent être séparés. Une des données du problème est donc l'ensemble des combinaisons véhicule/produit qui pourront être modifiées par l'hôpital pour tester différentes politiques de mutualisation possibles. Chaque véhicule est attaché à un dépôt d'où il part et où il doit revenir, cependant il peut passer par plusieurs dépôts pour compléter sa cargaison avant de commencer à livrer. Le temps de chargement d'un camion doit être pris en compte, il dépend de la quantité de chariots à emporter, ceci est particulièrement vrai pour les chariots de plateaux repas. La flotte de véhicules n'est pas homogène, en particulier les capacités sont différentes. La capacité d'un véhicule est définie par un nombre de chariots. Les véhicules ne peuvent pas tous décharger et charger leurs cargaisons au même moment, il y a un nombre de places limité par quai. Chaque hôpital possède un unique quai, sauf Bretonneau où certains bâtiments ont leur propre quai, en plus du grand quai qui doit servir de base à l'équipe de manutentionnaires et qui à terme devrait être le seul utilisé. Il existe deux types de places qui se distinguent par leurs structures. Les places basses qui nécessitent un élévateur pour charger ou décharger les chariots du véhicule et les places hautes qui sont au même niveau que l'arrière des véhicules. Il faut donc différencier pour ces types de places, un temps de chargement et de déchargement par chariot.

A Bretonneau, les chariots doivent être pris en charge par une équipe de manutention pour être emmenés dans les bâtiments. Pour effectuer ces livraisons, l'équipe peut se déplacer à pied ou utiliser des fenwiks (chariots tracteurs). L'utilisation de fenwicks souterrains

est obligatoire pour relier certains pavillons, les autres pavillons étant livrables par un fenwick extérieur ou à pied. L'équipe de manutention dispose de deux fenwicks souterrains et d'un fenwick extérieur. Un transport en fenwick permet de tracter un nombre maximum de chariots et un transport pédestre présente la même caractéristique, dans les deux cas cela mobilise un unique manutentionnaire et des chariots de tout type peuvent être mélangés.

Enfin le temps de livraison dépend du type de chariots, du nombre de chariots, du mode de transport et du point de livraison. Un point de livraison est caractérisé par une demande en un type de chariots avec une quantité et une fenêtre de temps durant laquelle la livraison ou collecte doit être réalisée. Cette fenêtre de temps peut être large, comme pour la logistique hôtelière, ou restreinte à un horaire, comme pour la pharmacie car une personne du service de soin doit réceptionner la livraison. Pour la plupart des demandes, un jour de livraison est affecté. Cependant pour certaines demandes ne devant être livrées qu'une seule fois par semaine, aucun jour n'est imposé. Il faudra donc déterminer le jour de livraison.

Le problème peut être vu sous la forme d'un problème de tournées de véhicules à deux niveaux. Le premier niveau porte sur les tournées entre les hôpitaux et le second niveau porte sur l'hôpital Bretonneau. Ces deux niveaux sont connectés par le quai de déchargements de Bretonneau qui est, du point vue du premier niveau, un point de livraison et du point de vue du second niveau l'unique dépôt du problème de tournées interne à Bretonneau. Il est manifeste que les planifications des tournées des véhicules de ces deux niveaux sont inter-connectées. Les manutentionnaires doivent attendre l'arrivée et le déchargement des camions pour livrer et inversement les camions de collecte doivent attendre la fin du ramassage de chariots qui leurs sont affectés pour pouvoir repartir. La figure 2.2 représente ces deux niveaux de tournées.

Notre objectif est de planifier les tournées en dimensionnant au mieux les équipes (chauffeurs et manutentionnaires) sachant qu'il n'y a qu'un chauffeur/livreur par camion et par fenwick. La somme globale des chauffeurs et manutentionnaires est une donnée du problème, nous essaierons de maximiser le temps libre global des manutentionnaires afin de leur permettre d'effectuer d'autres tâches dans l'hôpital Bretonneau comme par exemple le transport en interne de médicaments, de machines, de dossiers, etc. Un chauffeur/manutentionnaire doit travailler chaque jour 7h30, doit avoir les mêmes horaires de travail chaque jour et les équipes sont fixes (un chauffeur une journée ne peut pas être employé comme manutentionnaire le lendemain, ni l'inverse). Dans cette étude, nous nous intéressons à la planification périodique des cinq jours de la semaine. Le cas du week-end sera traité à part ultérieurement.

2.2 Littérature autour de ce problème

Ce vaste problème appartient à la classe des "*Pickup and Delivery Problems*". Ce problème possède des points communs avec de nombreux problèmes de transports abordés dans la littérature, nous allons nous restreindre uniquement à la littérature des problèmes

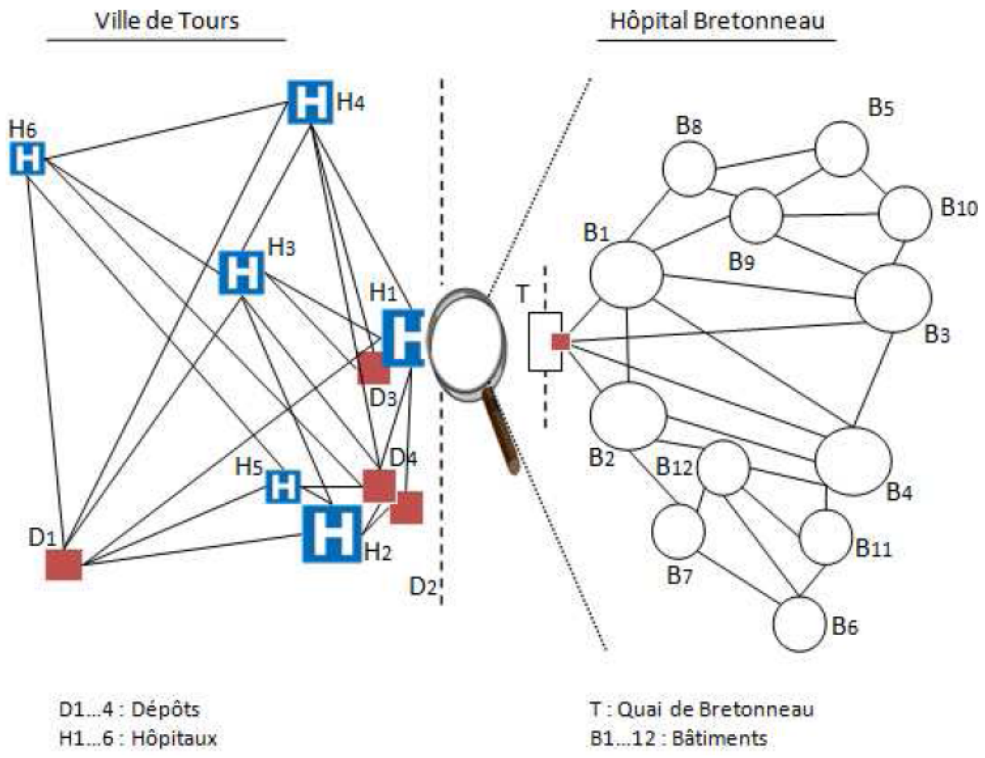


FIG. 2.2 – Réseaux des tournées

ayant des caractéristiques très similaires à celui du CHRU de Tours. Après une introduction aux problèmes de transports dans une première partie, nous présentons dans une seconde partie une littérature sur les problèmes de transports fortement similaires. Puis dans une troisème partie, nous abordons la littérature récente sur des problèmes de transports dans le milieu hospitalier.

2.2.1 Introduction aux problèmes de transports

Contrairement à la classe des problèmes d'ordonnancement où une classification et une notation des problèmes existant (Graham et al. [91]), la classe des problèmes de tournées de véhicules est moins facile à appréhender. Après avoir essayé de répertorier dans un premier temps la plupart de ces problèmes quelle que soit leur nature (cf. annexe B), nous nous sommes essentiellement intéressés à la catégorie des "*Pickup and Delivery Problems*" à laquelle appartient le problème général de la logistique au CHRU de Tours. Plusieurs classifications, ou même notations, ont été proposées pour cette catégorie de problèmes. L'une des classifications les plus pertinentes et récentes est celle de Berbeglia et al. [17]. Dans cet article, les auteurs présentent une classification et une notation se basant sur trois champs : [Structure | Visites | Véhicules]. Le premier champ indique le nombre d'origines et de destinations des biens ou personnes à transporter. Trois principales valeurs sont possibles :

– "Many-to-Many" (M-M) : chaque site, représenté par un sommet dans un graphe,

peut être aussi bien un point de départ ou une destination des biens ou personnes transportés.
- "One-to-Many-to-One" (1-M-1) : ce cas concerne principalement les biens comme dans le cas de la distribution de bouteilles pleines avec collecte de bouteilles vides. Tous les biens à distribuer à un ensemble de clients partent d'un unique dépôt. Puis, les biens à collecter chez un ensemble de clients doivent revenir à unique dépôt également.
- "One-to-One" (1-1) : chaque personne ou bien est caractérisé par un unique point de départ et d'arrivée.

Le deuxième champ porte sur la manière de collecter ou livrer à un sommet client : soit chaque sommet est collecté et livré en même temps et en une seule fois (PD), soit les deux opérations peuvent être réalisées ensemble ou séparément (P-D), soit chaque sommet représente une livraison ou une collecte (P/D). Enfin, une indication dans ce champ peut être ajoutée avec la lettre 'T' pour spécifier la possibilité de transbordement (zones temporaires de biens qui sont déposés par un ensemble de véhicules et qui seront collectés par un autre ensemble de véhicules). Enfin, le dernier champ précise le nombre de véhicules dans le problème, ou un nombre variable par le caractère '-'. Si nous utilisons cette notation, notre problème serait noté [1-M-1 | P/D T | -]. La figure 2.3 représente un résumé de cette classification proposé par les auteurs.

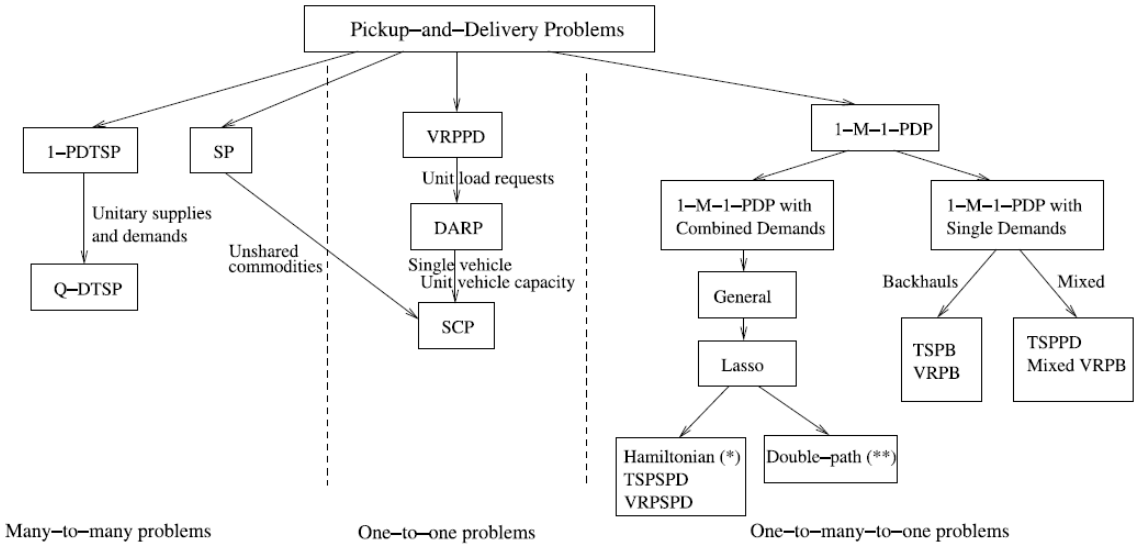


FIG. 2.3 – Résumé d'une classification des problèmes de tournées de véhicules (Berbeglia et al. [17])

A noter qu'il existe deux grandes classes de problèmes de planification de tournées : les problèmes de tournées sur arcs et les problèmes de tournées sur noeuds. Nous nous intéressons dans ce chapitre uniquement aux problèmes de tournées sur noeuds qui permettent de modéliser correctement le problème de logistique tel qu'il se présente au sein du CHRU. Cependant, ces deux classes de problèmes seront présentées dans le chapitre 6 section 6.2.

2.2.2 Problèmes de transports connexes

Ce problème est avant tout basé sur le problème classique de tournées de véhicules, ou encore *The Vehicle Routing Problem* (cf. Laporte [131]). Il existe de nombreux articles, revues et ouvrages traitant de ce problème et de ses nombreuses extensions. Des états de l'art très complets sont proposés par exemple dans Desaulniers et al. [56], Berbeglia et al. [17] et Parragh et al. [157]. La définition de ce problème s'appuie sur un graphe valué non orienté $G = (V, E)$, où $V = \{0, .., n\}$ est l'ensemble des sommets et E l'ensemble des arêtes. Le sommet 0 correspond au dépôt des véhicules (de capacité limitée) (chaque tournée de véhicule commence et termine au dépôt). Chaque sommet $i \neq 0$ représente un des n clients, un client étant caractérisé par une quantité de produit demandée. Chaque arête est valuée par un coût de déplacement. L'objectif du problème est de construire un ensemble de tournées de coût total minimal couvrant toutes les demandes, en respectant les capacités des véhicules sachant que chaque client est servi en une seule fois. De nombreuses méthodes ont été proposées pour résoudre ce problème aussi bien de manière exacte que de manière approchée. Certains articles, comme Laporte [129] ou Toth et Vigo [190], présentent ces différentes méthodes. Même si la plupart des cas traités dans la littérature sont de nature statique et déterministe, il existe des études avec un aspect aléatoire comme le problème de tournées de véhicules stochastiques. Cette catégorie de problème prend en compte un certain nombre de facteurs variables, comme les durées de déplacement, les volumes des commandes, voire le nombre de clients à servir. Un état de l'art sur ce type problème est disponible dans Gendreau et al. [85].

D'autre part, nous considérons le cas où les clients doivent être servis en respectant des fenêtres de temps. Le problème a été considérablement étudié, en commençant par Solomon [179]. Il a proposé un célèbre jeu de données et certaines heuristiques constructives pour minimiser le nombre de véhicules utilisés, puis la distance totale parcourue. Pour cette variante de problème, il existe aussi de nombreux états de l'art : Solomon et Desrosiers [180], Desrosiers et al. [57] et Bräysy et Gendreau [25] [26]. En plus d'être caractérisés par des fenêtres de temps, les clients peuvent être servis en plusieurs fois, c'est le cas du problème de tournées de véhicules avec préemption de la demande (SDVRP). Malgré l'importance de cette préemption dans les cas pratiques (Dror et Trudeau [63] [64]), le problème a été beaucoup moins étudié dans la littérature. Il existe cependant quelques articles s'intéressant au cas du SDVRP avec fenêtres de temps comme : Frizzell et Giffin [79], Ho et Haugland [98], Feillet et al. [70]. Le premier article propose une heuristique par construction avec deux variantes pour l'améliorer afin de résoudre le SDVRP avec multiples fenêtres de temps. Une recherche Tabou est proposée dans le deuxième article alors qu'une méthode exacte (*Branch and Price*) est proposée dans le troisième article.

Cependant, ce problème étant tiré d'un contexte spécifique, il s'éloigne un peu des problèmes classiques de VRP que nous pouvons trouver dans la littérature. L'un des premiers problèmes auxquels il se rapproche, est le problème de tournées de véhicules avec plusieurs types de produits, connu sous le nom *"The multi-commodity one-to-one pickup-and-delivery traveling salesman problem"* (m-PDTSP) comme traité récemment dans l'article de Hernández-Pérez et Salazar-González [97]. Les auteurs présentent deux modèles de pro-

grammation en nombres entiers mixtes et décrivent une technique de décomposition pour chaque modèle afin de résoudre ce problème. Le cas de plusieurs types de produits est aussi abordé dans les problèmes de tournées de véhicules à multi-compartiments, comme traité dans l'article de Mendoza et al. [143] où les demandes sont stochastiques. Mais d'autres études présentent aussi des caractéristiques proches de celles qui nous concernent, comme la possibilité de transporter les chariots par divers moyens (transport multimodal) que l'on retrouve principalement dans la logistique du fret. Un état de l'art sur cette catégorie de problèmes de transports est disponible dans un article de Crainic et Laporte [47]. Dans un article de Horn [101], l'auteur s'intéresse aussi à des transports multimodaux. Il présente un système de planification de tournées de véhicules appelé L2sched permettant de manager une flotte hétérogène de véhicules destinée à des transports de personnes.

Certaines demandes de notre problème n'ont pas un jour de livraison fixé. Les choix des jours de livraison de ces demandes font partie aussi des variables du problème. Ce type de décision peut se retrouver dans la littérature des problèmes de tournées de véhicules multi-périodes (*Periodic VRP*). Dans ce type de problème, chaque client doit être servi une ou plusieurs fois dans un horizon donné. Le problème peut se décomposer en deux sous-problèmes indépendants : affectation des séquences de livraisons pour chaque client, et résolution d'un problème classique de tournées de véhicules par jour de l'horizon. Ce problème a été initialement étudié dans un contexte de collecte d'ordures (Beltrami et Bodin [16]) et continu toujours à être étudié dans ce contexte (Lacomme et al [126]). Dans l'article de Angelelli et Speranza [3], les auteurs s'intéressent à ce type de problème de collectes d'ordures en considérant que les véhicules peuvent, pendant leurs tournées, décharger les ordures collectées à certains lieux de traitements qui ne sont pas nécessairement leurs dépôts. Ils proposent une recherche Tabou pour résoudre ce problème. Enfin, un article de Cordeau et al. [45] présente une recherche Tabou pour des problèmes de tournées de véhicules multi-périodes et multi-dépôts.

Une autre caractéristique de notre problème concerne le quai de Bretonneau qui peut être vu comme un dépôt de transfert, ou transbordement (*VRP with transshipment*) : point d'échange de produits entre véhicules. On retrouve ce concept dans les articles de Zhao et al. [201] et de Yang et Xiao [198], où des problèmes de VRP avec points de transfert sont traités dans le cas multi-périodes puis multi-produits. Dans les deux articles les auteurs résolvent le problème à l'aide de la programmation mathématique en s'appuyant sur des techniques de procédure par séparation et évaluation ainsi que sur certaines propriétés structurelles du problème.

Les problèmes d'élaboration de tournées de véhicules sous contraintes de planification du personnel se retrouvent fréquemment dans les problèmes postiers. Nous citerons comme premier exemple l'article de Zäpfel et Bögl [199]. Dans cet article, les auteurs s'intéressent à un problème de tournées de véhicules multi-périodique avec livraison et ramassage de courrier postal et de planification du personnel. Le volume de cargaison est variable, certains points possèdent des fenêtres de temps, les capacités des véhicules sont variables et il est possible de sous-traiter certaines demandes. Pour résoudre ce problème, les auteurs proposent une hybridation de méta-heuristiques qui est testée par simulation. Dans un article

de Hollis et al. [100], les auteurs présentent la résolution du problème postal "Australia". Le problème considéré est un problème multi-dépôts de planification de tournées de véhicules et de personnel. La principale contribution de ce papier est une nouvelle formulation mathématique intégrant les étapes de planification des véhicules et des équipes. Pour résoudre ce problème, les auteurs utilisent un algorithme basé sur la génération de colonne.

Enfin, la gestion des chariots vides et pleins de notre problème est similaire au problème de transport de conteneurs vides et pleins comme étudié dans l'article de Tan et al. [186]. Dans cet article, les auteurs s'intéressent à une compagnie de logistique qui détient des véhicules munis de remorques mais qui peut éventuellement sous-traiter en cas de pics de demandes. Le problème est bicritère car ils veulent minimiser le nombre de véhicules et la distance totale parcourue. Ils le résolvent en utilisant dans un algorithme évolutionnaire, des opérateurs de croisement spécifiques et une représentation des solutions à longueurs variables pour énumérer le front de Pareto.

2.2.3 Problèmes de transports dans le milieu hospitalier

Pendant longtemps, et même encore aujourd'hui, les centres hospitaliers ont souvent négligé le rôle de la logistique. Landry et Philippe [127] font remarqué en 2004 que toutes les activités en rapport avec la logistique engendrent environ 46% du budget total d'un hôpital. D'autre part, dans un livre consacré au flux de patients et à la réduction du retard de procuration des soins [172], certaines parties montrent que la logistique peut être aussi un des facteurs du processus d'amélioration de production de soins. Bien que le milieu hospitalier soit un secteur d'application assez récent pour les problèmes de transports et de logistique, il existe déjà plusieurs articles dans ce domaine.

L'un des premiers articles est apparu en 1996 (Shang et Carolyn [175]). Les auteurs s'intéressent à un problème de transports de dossiers patients, d'équipements et de fournitures médicales dans une région métropolitaine. Ce problème peut se ramener à un "*pickup and delivery problem*" avec fenêtre de temps et sans contrainte de capacité. La fonction multi-objectif du problème tient compte des critères à minimiser suivants : le nombre de véhicules utilisés, le nombre de demandes non satisfaites ou réalisées en retard et la distance totale parcourue par les véhicules. Pour résoudre ce problème, les auteurs proposent une heuristique basée sur une "approche concurrente d'ordonnancement" dans laquelle chaque client est affecté à un ou plusieurs véhicules à la fois. Un autre problème de transports de matériel médical est abordé dans un article de Sheng et al. [176]. Les auteurs s'intéressent à un problème classique de type VRP avec un unique dépôt de distribution de matériel médical dans un hôpital. Cette étude est basée sur de la logique floue pour la mesure des critères. Le problème est résolu à l'aide d'une heuristique en six étapes dont une étape consiste à appliquer un algorithme génétique.

Le chapitre, écrit par Doerner et Hartl [59] dans un livre sur les avancées et les derniers challenges des problèmes de tournées de véhicules, est entièrement consacré aux problèmes de transports dans le domaine de la logistique hospitalière, de préparation aux situations d'urgence et de secours en cas de catastrophe. Comme le précisent les auteurs, les problèmes

fondamentaux sous-jacents sont des problèmes de tournées de véhicules, des transports à la demande, d'emplacement des entrepôts de routage et de couverture d'urgence. Toutefois, plusieurs contraintes du monde réel de l'hôpital permettent d'enrichir les caractéristiques de base des problèmes. Dans les problèmes de tournées de véhicules, autres que des problèmes de transports de patients par ambulance, les auteurs présentent des problèmes liés à la logistique de transports de matériel médical ainsi qu'à la collecte et la distribution de poches de sang. Ce dernier problème engendre deux extensions au modèle du VRP. La première extension est que les marchandises sont produites sur les sites, la production prenant place dans certaines fenêtres de temps. La deuxième extension introduit la notion de contrainte de temps stricte, sur un transport des poches de sang. Un autre problème également étudié dans ce chapitre est celui de la distribution de sang à l'aide de tournées de véhicules périodiques.

Un domaine autre que le transport de poche de sang et assez étudié, est celui de la distribution du linge sale (Florez et al. [74]) et propre (Banerjea-Brodeur et al. [11]) dans le milieu hospitalier. Dans le premier article, les auteurs s'intéressent à la logistique du flux du linge sale hospitalier à Bogotá. Ce problème est équivalent à un problème de tournées de véhicules avec la possibilité de servir un client en plusieurs fois (*Split Delivery Vehicle Routing Problem* [64]). Les auteurs proposent un modèle de programmation linéaire mixte pour trouver de nouvelles périodes de travail et de tournées de véhicules sous contraintes de disponibilité de ressources et de conditions d'hygiène. Le deuxième article présente un problème de planification de livraison de linge dans un vaste hôpital. Les auteurs ramènent ce problème à un problème classique de tournées périodiques de véhicules et utilisent une recherche Tabou pour le résoudre.

D'autres flux dans les hôpitaux différents du linge propre ou sale, font aussi l'objet de problèmes de tournées. Dans l'article de Shih et Chang [177], le flux étudié est celui des déchets infectieux dans des centres hospitaliers de Taiwan. Comme ce type de déchet nécessite un traitement spécifique, des tournées de véhicules périodiques pour collecter les déchets et les amener à une ou plusieurs usines de traitements sont à établir. Les auteurs proposent une heuristique à deux phases pour résoudre ce problème. Une phase consiste à trouver les jours de collectes en utilisant la programmation linéaire en nombres entiers mixte. Une autre phase consiste à résoudre un problème de tournées de véhicules dont les jours de collectes pour chaque client sont connus.

D'autres études ne se focalisent pas uniquement sur les problèmes de tournées mais sur la logistique en général. C'est le cas de l'étude de Lapierre et Ruiz en 2007 [128] qui concerne l'hôpital de Montréal. Dans cette étude, les auteurs traitent ce problème de logistique hospitalière dans sa globalité : commandes, livraisons et capacités des stocks. Les auteurs se sont concentrés sur la planification des décisions comme la date des commandes, les dates de livraisons et les quantités à livrer ainsi que sur la répartition des tâches au personnel. Ils présentent deux approches de modélisation et appliquent sur ces modélisations une recherche Tabou utilisant des voisinages de quatre types différents pour résoudre ce problème.

Un dernier type de problème de transport fait l'objet d'une étude récente dans un hôpital d'Autriche (Fiegl et Pontow [71]). Cette étude porte sur un problème de transport à la demande aussi bien de patients que de matériel médical. Les demandes de transports arrivent en temps réels et sont assurées par une équipe de l'hôpital ayant pour rôle d'assurer toutes ces demandes à l'heure. Même si ce problème appartient à la classe des problèmes "*Pickup and Delivery*", les auteurs ramènent ce problème à un problème d'ordonnancement (machines parallèles non reliées avec minimisation de la somme pondérée du "*flow time*"). Les auteurs s'inspirent des algorithmes de la littérature pour résoudre ce problème d'ordonnancement et proposer une méthode de résolution.

Enfin, une étude menée en collaboration avec un service hospitalier Belge de livraison est disponible dans un article de Gascon et Mechelon [80]. Les auteurs s'intéressent à un problème d'ordonnancement de tâches de livraisons effectuées par des manutentionnaires dans un hôpital. L'objectif de cette étude est de comparer deux systèmes de livraisons sur le nombre de personnes nécessaires aux transports. Le système actuel est basé sur l'utilisation de doubles chariots de produits (un chariot reste toujours dans une unité de soin et un autre chariot sert à remplacer le premier lorsque celui-ci est presque vide). Le deuxième système prévu (pour diminuer le nombre de chariots et la quantité d'espace d'encombrement) est plus classique, il n'y a qu'un chariot qui sert à emmener les produits dans une unité de soin. Cependant pour ce dernier système, les auteurs proposent une heuristique pour trouver le nombre de manutentionnaires et leurs horaires. Ce problème est traité en deux étapes. La première consiste à affecter les jours de livraisons de chaque service en considérant des ensembles de tâches qu'auront à réaliser les manutentionnaires. Et la deuxième étape consiste à résoudre un problème d'affectation des tâches aux manutentionnaires et à trouver leurs horaires.

2.3 Conclusion

Le problème étudié dans cette première partie est un problème de tournées de véhicules avec livraisons et collectes, et dimensionnement du personnel. Etant tiré d'un contexte hospitalier spécifique, de nombreuses contraintes propres à ce contexte sont à prendre en compte. L'objectif du problème est de trouver une planification de tournées de véhicules sur un horizon d'une semaine ainsi que le nombre et les horaires des chauffeurs et des manutentionnaires. Le problème peut être vu sous la forme de deux problèmes de tournées de véhicules à deux niveaux qui sont interconnectés au quai de Bretonneau.

De nombreux problèmes de transports étudiés dans la littérature présentent des caractéristiques similaires (fenêtres de temps, flotte hétérogène sur plusieurs dépôts, contraintes de planification de personnel, point de transfert, multi-périodes, multi-produits, etc.). Cependant, il n'existe pas à notre connaissance d'étude regroupant toutes ces caractéristiques. D'autre part, la synchronisation de plusieurs tournées de véhicules à un endroit donné n'est pas une problématique couramment abordée dans la littérature à notre connaissance.

Enfin, les problèmes de logistique au sein d'un système hospitalier commencent à être

abordés. Dans la littérature, plusieurs études de problèmes de tournées de véhicules sont tirées d'un contexte hospitalier : ramassage du linge sale, livraison du linge propre, collecte des déchets, transports de poche de sang ou de matériel médicale, etc. Dans notre étude, il faut tenir compte conjointement de tous les flux de la logistique hospitalière, contrairement à ce qu'on trouve dans la littérature, où ils sont abordés de façon séparée. En conséquence, les méthodes proposées dans la littérature ne sont pas utilisables en l'état.

Chapitre 3

Optimisation des tournées et dimensionnement des équipes : Modèle exploratoire

Dans ce chapitre, nous nous intéressons au problème d'optimisation des tournées des véhicules de la logistique du CHRU. L'étude de ce problème est abordée de manière générale et théorique. Nous présentons dans une première section la notation et la modélisation du problème. Puis nous proposons un modèle de Programmation Linéaire en Nombre Entier (PLNE) (Kergosien et al. [116]). Ce PLNE a surtout permis de poser clairement le problème. Nous proposons ensuite deux méthodes de résolution, deux méta-heuristiques. La première est un algorithme de population (algorithme génétique, Kergosien et al. [115] et [113]) alors que la seconde méthode est un algorithme de voisinage (recherche tabou). Des résultats expérimentaux sur ces trois méthodes sont présentés à la fin de ce chapitre.

3.1 Définition et notation du problème

Le problème est défini comme il a été présenté dans la section 2.1 du chapitre 2. L'objectif est de trouver une planification des tournées de véhicules entre les différents hôpitaux et des manutentionnaires entre les différents bâtiments de Bretonneau, ainsi que de déterminer le nombre de chauffeurs et de manutentionnaires nécessaires. Dans cette première étude, on suppose qu'à l'hôpital Bretonneau seul le grand quai est utilisé. les camions viennent y charger ou décharger leur cargaison et de là les manutentionnaires se chargent de dispatcher les chariots dans les services récipiendaires, soit à pied, soit en utilisant les fenwicks intérieurs ou extérieurs, suivant le bâtiment à desservir. Les manutentionnaires se chargent également de collecter les chariots de linge sale et les déchets pour les amener au quai. Il faut donc tenir compte de tous les flux et les traiter conjointement. D'autre part, il faut aussi synchroniser les deux niveaux de tournées de véhicules au quai de Bretonneau. De nombreuses contraintes sont à prendre en compte dans ce premier modèle comme des contraintes de terrain, la séparation de certains flux comme le linge propre et le linge sale, des gestions spécifiques, notamment des procédures de livraisons au sein des services, le

nombre de places aux quais de déchargement, en particulier à l'hôpital Clocheville, la multiplicité des moyens de transports, etc. Seules les contraintes de temps de préparation ou production des chariots et de distinction de types de quais (hauts ou bas) n'ont pas été prises en comptes.

Nous notons $\mathcal{A}$ un ensemble d'emplacements regroupant un ensemble de dépôts $\mathcal{D}$, un ensemble d'hôpitaux $\mathcal{H}$ et un ensemble de bâtiments $\mathcal{B}$ à l'intérieur d'un même hôpital T ($T \in \mathcal{H}$). T représente l'hôpital Bretonneau. Il sert de zone de transfert entre les véhicules inter-hôpitaux et les véhicules intra-hôpitaux. L'ensemble des notations que nous utilisons est le suivant :

- τ : la période de planification et t l'indice du jour dans cette période. Les demandes qui ne sont pas préaffectées à un jour de la semaine, seront indicées par $\tau + 1$. La période de planification considérée est d'une semaine étant donné que la fréquence des demandes du CHRU sont au plus d'une semaine.
- $\mathcal{P}$: l'ensemble des types de chariots (le type est associé au produit transporté donc au flux). Nous confondrons par la suite type de chariot et produit. Pour chaque type de chariot ou produit p nous posons :
  - v_p : volume d'un chariot de type p (utile pour les camions).
  - p_p : poids moyen d'un chariot de type p.
  - $tl_{i,p}$: temps de livraison (hors transport) du chariot de type p depuis le point de livraison $i \in \mathcal{H} \cup \mathcal{B}$.
  - tch_p : temps de chargement ou déchargement du chariot de type p.
  - g_p : temps d'autonomie du chariot de type p s'il est limité en temps de transport (concerne l'UCPA).
- Pour chaque point de livraison à desservir i, hormis T ($i \in \mathcal{H} \cup \mathcal{B} \setminus T$) :
  - $q_{i,p,t}$: quantité de chariots de type p demandés le jour t.
  - $[e_{i,p,t}, l_{i,p,t}]$: fenêtre de temps pendant laquelle les chariots en produit p sont attendus pour le jour t.
  - $Quai_i$: le nombre de places sur le quai de chargement et déchargement du point i.
- Pour l'emplacement particulier T (zone de transfert des chariots à Bretonneau) :
  - $q_{T,p,t} = \sum_{i \in \mathcal{B}} q_{i,p,t}$: quantité de chariots de type p demandés pour le jour t par l'ensemble des bâtiments de T.
  - $[e_{T,p,t}, l_{T,p,t}] = [min_{i \in \mathcal{B}}(e_{i,p,t}), max_{i \in \mathcal{B}}(l_{i,p,t})]$: fenêtre de temps associée à la demande en chariots p pour le jour t.
  - $Quai_T$: le nombre de places sur le quai de chargement et déchargement de Bretonneau.
- $d_{i,j}$: distance (en temps) entre deux emplacements i et $j \in \mathcal{A}$.
- $\mathcal{V}$: l'ensemble des véhicules se déplaçant entre les hôpitaux avec :
  - Cv_v : la capacité en volume du véhicule v.
  - Cp_v : la capacité en poids du véhicule v.
- $\mathcal{F}int \cup \mathcal{F}ext$: l'ensemble des fenwick se déplaçant à l'intérieur des couloirs sous-terrain de Bretonneau et l'ensemble des véhicules fenwick se déplaçant en extérieur entre les bâtiments de Bretonneau :
  - FCn_v : la capacité en nombre de chariots tractables par le fenwick v.
  - FCp_v : la capacité en poids de chariots tractables par le fenwick v.

- Pour chaque moyen de transport v de l'ensemble $\mathcal{V} \cup \mathcal{F}int \cup \mathcal{F}ext$:
  - Vit_v : le facteur de vitesse du moyen de transport v.
  - D_v : le dépôt du moyen de transport v (pour les fenwicks, le dépôt correspond au quai de Bretonneau).
  - $\mathcal{N}_v$: l'ensemble des emplacements livrables par le moyen de transport v.
  - $\mathcal{B}_v$: l'ensemble des produits transportables par le moyen de transport v.
- $\mathcal{R}$: l'ensemble des personnes (chauffeurs/manutentionnaire $r \in \mathcal{R}$), avec T_{max} la durée de travail maximale par jour avec pause, c_{max} le nombre maximal de chariots que peut tirer un manutentionnaire à pied, p_{max} le poids maximal qu'il peut tirer et Vit_{pieds} le facteur de vitesse du transport à pieds.

3.2 PLNE

Pour une première étude de ce problème, nous allons exposer un modèle de programmation linéaire en nombres entiers qui va permettre d'identifier et de formuler clairement toutes les contraintes du problème. Avant de présenter le modèle de PLNE, nous allons introduire les notations utilisées et quelques libertés qui ont été prises. Pour alléger la formulation en PLNE, nous avons fait l'hypothèse que le quai de Clocheville est limité à une place, les autres ne sont pas limités. De plus, nous considérons que toutes les demandes sont préaffectées à un jour, enfin les bâtiments de Bretonneau sont livrables uniquement par manutentionnaire. Chaque manutentionnaire se voit affecté un unique moyen de transport, certains se déplaceront toujours à pied tandis que d'autres utiliseront toujours le même fenwick.

Une des difficultés du modèle est qu'il ne s'agit pas simplement d'un problème de tournées avec plusieurs voyageurs. On doit en fait déterminer plusieurs tournées successives pour plusieurs voyageurs (véhicules), sachant que le nombre de tournées effectuées par chaque voyageur n'est pas connu à l'avance. On fixe arbitrairement que chaque véhicule effectuera au plus m tournées. On a un nombre total de moyens de transports égal à w (les camions, les fenwicks, les manutentionnaires à pied), donc on doit déterminer au plus $w \times m$ routes. La formulation s'appuie donc sur un ensemble de $w \times m$ routes parcourues dans une journée. Cela regroupe l'ensemble $\mathcal{M}_{inter}$ des routes inter-hôpitaux et l'ensemble $\mathcal{M}_{intra}$ des routes entre les bâtiments $\mathcal{B}$ et T, l'hôpital Bretonneau. L'ensemble de toutes les routes est noté $\mathcal{M} = \mathcal{M}_{inter} \cup \mathcal{M}_{intra}$. A chaque moyen est associé un ensemble de m routes, une route pouvant éventuellement être vide (les routes de 1 à m correspondent au premier véhicule, de $m+1$ à $2m$ au deuxième véhicule, etc.). Chaque route est donc caractérisée par un départ et un retour au même dépôt D_v, et un moyen de transport v (camions, fenwicks, pied). Nous noterons Φ la fonction qui permet de passer d'un indice d'une route k à l'indice du moyen de transport correspondant $v = \Phi(k)$. Le nombre final de routes n'étant pas connu à l'avance, nous fixons le nombre m en fonction du système actuel et des quantités demandées par rapport aux capacités des moyens de transports. Chaque type de moyen de transport étant limité, nous imposerons une contrainte de succession d'utilisation de véhicules ou fenwicks entre deux routes utilisant le même véhicule ou fenwick. Enfin, nous noterons $\mathcal{O}$ un ensemble d'indices de tournées, une même personne

assure un maximum de $|\mathcal{O}|$ tournées par jour, une tournée correspond à une route.

3.2.1 Les variables

Les variables du PLNE sont les suivantes :
- $x_{i,j}^{k,t} = 1$ si la route k passe par les emplacements i puis j le jour t ; 0 sinon ($\forall k \in \mathcal{M}, \forall i,j \in D_{\Phi(k)} \cup \mathcal{N}_{\Phi(k)}$ $(i \neq j), \forall t \in \tau$)
- $dep_i^{k,t}$ = date de départ (ou de fin de livraison) de la route k le jour t à l'emplacement i si $i = \mathcal{N}_{\Phi(k)}$; date de départ du dépôt de la route k le jour t si $i = D_{\Phi(k)}$ ($\forall k \in \mathcal{M}, \forall i \in D_{\Phi(k)} \cup \mathcal{N}_{\Phi(k)}, \forall t \in \tau$)
- $fin^{k,t}$ = date de fin de la tournée k le jour t ($\forall k \in \mathcal{M}, \forall t \in \tau$)
- $IQc_{i,p}^{k,t} = 1$ si la route k livre au moins un chariot de produits p à l'emplacement i le jour t ; 0 sinon ($\forall k \in \mathcal{M}, \forall i \in \mathcal{N}_{\Phi(k)}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P}$)
- $Qc_{i,p}^{k,t} = \alpha$ si la route k livre α chariots de produits p à l'emplacement i le jour t ; 0 sinon ($\forall k \in \mathcal{M}, \forall i \in \mathcal{N}_{\Phi(k)}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P}$)
- $IQtr_p^{k_1,k_2,t} = 1$ si la route k_1 transporte au moins un chariot de produits p pour la route k_2 le jour t ; 0 sinon ($\forall k_1 \in \mathcal{M}_{inter}, k_2 \in \mathcal{M}_{intra}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P}$)
- $Qtr_p^{k_1,k_2,t} = \alpha$ si la route k_1 transporte α chariots de produit p pour la route k_2 le jour t ; 0 pour aucune livraison ($\forall k_1 \in \mathcal{M}_{inter}, k_2 \in \mathcal{M}_{intra}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P}$)
- $Liv_r^{k,o,t} = 1$ si la personne r est affectée à la route k lors de sa o^{ieme} tournée le jour t ; 0 sinon ($\forall k \in \mathcal{M}, o \in \mathcal{O}, \forall t \in \tau, \forall r \in \mathcal{R}$)
- $Ma_r = 1$ si la personne r est affectée à des routes de $\mathcal{M}_{intra}$; 0 si la personne r est affectée à des routes de $\mathcal{M}_{inter}$ ($\forall r \in \mathcal{R}$)
- $Ex_{k_1,k_1'}^t = 1$ si la route k_1 passe avant k_1' à Clocheville ; 0 si la route k_1' passe avant k_1 à Clocheville ($\forall k_1, k_1' \in \mathcal{M}_{inter}, k_1 \neq k_1'$ et utilisant des véhicules différents, $\forall t \in \tau$). Clocheville est l'hôpital ne possédant qu'une unique place de déchargement.

3.2.2 Les contraintes

Les contraintes du PLNE sont les suivantes :

$$\forall k \in \mathcal{M}, \forall t \in \tau : \sum_{i \in \mathcal{N}_{\Phi(k)}} x_{D_{\Phi(k)},i}^{k,t} \leq 1 \tag{3.1}$$

$$\forall k \in \mathcal{M}, \forall i \in D_{\Phi(k)} \cup \mathcal{N}_{\Phi(k)}, \forall t \in \tau : \sum_{j \in D_{\Phi(k)} \cup \mathcal{N}_{\Phi(k)} / i \neq j} x_{j,i}^{k,t} = \sum_{j \in D_{\Phi(k)} \cup \mathcal{N}_{\Phi(k)} / i \neq j} x_{i,j}^{k,t} \tag{3.2}$$

$$\forall k \in \mathcal{M}, \forall i \in \mathcal{N}_{\Phi(k)}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P} : \; q_{i,p,t} \sum_{j \in D_{\Phi(k)} \cup \mathcal{N}_{\Phi(k)} / i \neq j} x_{j,i}^{k,t} \geq Qc_{i,p}^{k,t} \tag{3.3}$$

$$\forall k_1 \in \mathcal{M}_{inter}, \forall t \in \tau : \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{i \in \mathcal{N}_{\Phi(k_1)}} Qc_{i,p}^{k_1,t} v_p \leq Cv_{\Phi(k_1)} \tag{3.4}$$

$$\forall k_1 \in \mathcal{M}_{inter}, \forall t \in \tau : \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{i \in \mathcal{N}_{\Phi(k_1)}} Qc_{i,p}^{k_1,t} p_p \leq Cp_{\Phi(k_1)} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned} \forall k_2 \in \mathcal{M}_{intra}, \forall t \in \tau : \ si\ \Phi(k_2) \in \mathcal{F}int \cup \mathcal{F}ext\ alors \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{i \in \mathcal{N}_{\Phi(k_2)}} Qc_{i,p}^{k_2,t} &\leq FCn_{\Phi(k_2)} \\ sinon \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{i \in \mathcal{N}_{\Phi(k_2)}} Qc_{i,p}^{k_2,t} &\leq c_{max} \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned} \forall k_2 \in \mathcal{M}_{intra}, \forall t \in \tau : \ si\ \Phi(k_2) \in \mathcal{F}int \cup \mathcal{F}ext\ alors \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{i \in \mathcal{N}_{\Phi(k_2)}} Qc_{i,p}^{k_2,t} p_p &\leq FCp_{\Phi(k_2)} \\ sinon \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{i \in \mathcal{N}_{\Phi(k_2)}} Qc_{i,p}^{k_2,t} p_p &\leq p_{max} \end{aligned} \tag{3.7}$$

$$\forall i \in \mathcal{H} \cup \mathcal{B}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P} : \sum_{k \in \mathcal{M}} Qc_{i,p}^{k,t} = q_{i,p,t} \tag{3.8}$$

Les contraintes (3.1) imposent à chaque route k de quitter au plus une fois son dépôt. Les contraintes (3.2) assurent la continuité des circuits : lorsqu'une route k arrive à un point i, elle repart de ce même point. Les contraintes (3.3) assurent la cohérence des variables de livraison : si une route k ne passe pas en un emplacement i, la quantité livrée en i en tout produit p est nulle. La quantité totale que livre une route à tous ses points de livraison ne doit pas excéder la capacité du véhicule correspondant en terme de nombre, poids et volume. Les contraintes (3.4), (3.5), (3.6) et (3.7) imposent cette restriction en fonction des types de routes (inter ou intra-hôpitaux). Enfin les contraintes (3.8) signifient que chaque client doit recevoir la quantité de chariots qu'il a demandé.

Les contraintes ci-dessous définissent l'ensemble des produits transportables par un véhicule, comme par exemple les véhicules qui ne transportent uniquement du linge sale.

$\forall k \in \mathcal{M}, \forall i \in \mathcal{N}_{\Phi(k)}, \forall p \in \mathcal{P}$ tel que la route k ne peut pas livrer de produit $p, \forall t \in \tau$:

$$Qc_{i,p}^{k,t} = 0 \tag{3.9}$$

$$\forall k \in \mathcal{M}, \forall i \in \mathcal{N}_{\Phi(k)}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P} : Qc_{i,p}^{k,t} \geq IQc_{i,p}^{k,t} \tag{3.10}$$

$$\forall k \in \mathcal{M}, \forall i \in \mathcal{N}_{\Phi(k)}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P} : IQc_{i,p}^{k,t} \geq \frac{Qc_{i,p}^{k,t}}{q_{i,p,t}} \tag{3.11}$$

Ces contraintes (3.10) et (3.11) définissent les variables d'état de livraison, $IQc_{i,p}^{k,t}$, pour une route k à un emplacement i en chariot p à un jour t en fonction de la variable de quantité livrée associée.

$$\forall k \in \mathcal{M}, \forall i \in \mathcal{N}_{\Phi(k)}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P} : \quad IQc_{i,p}^{k,t} e_{i,p,t} \leq dep_i^{k,t} \tag{3.12}$$

$$\forall k \in \mathcal{M}, \forall i \in \mathcal{N}_{\Phi(k)}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P} : \quad dep_i^{k,t} \leq l_{i,p,t} + HV(1 - IQc_{i,p}^{k,t}) \tag{3.13}$$

Les contraintes (3.12) et (3.13) assurent le respect des fenêtres de temps de livraison.

$$\begin{gathered} \forall k \in \mathcal{M}, \forall i \in D_{\Phi(k)} \cup \mathcal{N}_{\Phi(k)}, \forall j \in \mathcal{N}_{\Phi(k)}, \forall t \in \tau : \\ dep_i^{k,t} + d_{i,j} Vit_{\Phi(k)} + \sum_{p \in \mathcal{P}} tl_{i,p} Qc_{i,p}^{k,t} \leq dep_j^{k,t} + HV(1 - x_{i,j}^{k,t}) \end{gathered} \tag{3.14}$$

Les contraintes (3.14) expriment les contraintes temporelles entre deux points de livraison i et j se succédant sur une même route k.

$$\forall k \in \mathcal{M}, \forall i \in \mathcal{N}_{\Phi(k)}, \forall t \in \tau : dep_i^{k,t} + d_{i,D_{\Phi(k)}} Vit_{\Phi(k)} \leq fin^{k,t} + HV(1 - x_{i,D_{\Phi(k)}}^{k,t}) \tag{3.15}$$

Les contraintes (3.15) permettent de définir les dates de retours aux dépôts.

$$\forall k_1 \in \mathcal{M}_{inter}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P} : Qc_{T,p}^{k_1,t} = \sum_{k_2 \in \mathcal{M}_{intra}} Qtr_p^{k_1,k_2,t} \tag{3.16}$$

$$\forall k_2 \in \mathcal{M}_{intra}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P} : \sum_{i \in \mathcal{B}} Qc_{i,p}^{k_2,t} = \sum_{k_1 \in \mathcal{M}_{inter}} Qtr_p^{k_1,k_2,t} \tag{3.17}$$

Les relations entre les quantités de chariots livrées au quai de Bretonneau et dans Bretonneau sont exprimées dans les contraintes (3.16) et (3.17). Pour un chariot de type p donné, la somme de tous les chariots livrés par les routes intra-Bretonneau, en provenance de la route inter-hopitaux k_1 est égale au nombre de chariots livrés par k_1 au quai (3.16). De plus tous les chariots de type p livrés par les routes intra-Bretonneau k_2 proviennent des routes k_1 de l'extérieur de Bretonneau (3.17).

$$\forall k_1 \in \mathcal{M}_{inter}, \forall k_2 \in \mathcal{M}_{intra}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P} : Qtr_p^{k_1,k_2,t} \geq IQtr_p^{k_1,k_2,t} \tag{3.18}$$

$$\forall k_1 \in \mathcal{M}_{inter}, \forall k_2 \in \mathcal{M}_{intra}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P} : IQtr_p^{k_1,k_2,t} \geq \frac{Qtr_p^{k_1,k_2,t}}{q_{T,p,t}} \tag{3.19}$$

De la même manière que (3.10) et (3.11), les contraintes (3.18) et (3.19) permettent de définir les variables d'état de transfert de chariots de type p entre une route k_2 intra-Bretonneau et une route k_1 extérieur à un jour t en fonction des variables de quantité transférées.

Les contraintes (3.20) et (3.21) définissent les relations de précédence entre routes intra et inter-hôpitaux transportant les mêmes produits. C'est-à-dire, le départ d'une route k_2 intra-Bretonneau transportant des chariots de produits p provenant d'une route extérieure k_1 ne peut s'effectuer que lorsque la route k_1 a fini de décharger au quai tous ses chariots (3.20). Dans le cas contraire d'un ramassage de linge sale par exemple, la route k_1 ne peut partir du quai de Bretonneau que lorsque les chariots de linges sale ont tous été collectés par l'équipe de manutention (3.21).

$\forall k_1 \in \mathcal{M}_{inter}, \forall k_2 \in \mathcal{M}_{intra}\ (T = D_{\Phi(k_2)}), \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P}$ p étant des chariots à livrer :

$$dep_T^{k_1,t} \leq dep_T^{k_2,t} + HV(1 - IQtr_p^{k_1,k_2,t}) \tag{3.20}$$

$\forall k_1 \in \mathcal{M}_{inter}, \forall k_2 \in \mathcal{M}_{intra}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P}$ p étant des chariots à récuperer :

$$dep_T^{k_1,t} \geq fin^{k_2,t} - HV(1 - IQtr_p^{k_1,k_2,t}) \tag{3.21}$$

Si une route k succède à une autre route k' avec le même véhicule alors la route k' ne peut démarrer que lorsque la première a fini son tour et que le véhicule est chargé. Nous définissons donc les contraintes suivantes :

$\forall k, k' \in \mathcal{M}$ tel que k précède la route k' avec le même véhicule, $\forall t \in \tau$:

$$fin^{k,t} + \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{j \in \mathcal{N}_{\Phi(k')}} Qc_{j,p}^{k',t} tch_p \leq dep_{D_{Phi(k)}}^{k',t} \tag{3.22}$$

Certains chariots, en particulier les plateaux repas, ne peuvent pas être transportés au delà d'une certaine durée (g_p). Les contraintes (3.23) et (3.24) permettent de tenir compte de l'autonomie de ces chariots.

$\forall k \in \mathcal{M}, \forall i \cup \mathcal{N}_{\Phi(k)}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P}$ tel que p est limité dans la durée de transport :

$$dep_i^{k,t} - dep_{D_{\Phi(k)}}^{k,t} \leq g_p + HV(1 - IQc_{i,p}^{k,t}) \tag{3.23}$$

$$\forall k_1 \in \mathcal{M}_{inter}, \forall k_2 \in \mathcal{M}_{intra}, \forall i \cup \mathcal{N}_{\Phi(k_2)}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P} :$$
$$dep_i^{k_2,t} - dep_{D_{\Phi(k_1)}}^{k_1,t} \leq g_p + HV(2 - IQc_{i,p}^{k_2,t} - IQtr_p^{k_1,k_2,t}) \tag{3.24}$$

Les contraintes (3.23) limitent la durée de transport de certains chariots dans une même route. Alors que les contraintes (3.24) limitent la durée de transport de certains chariots empruntant des routes inter-hôpitaux puis intra-Bretonneau.

Les contraintes (3.25) et (3.26) assurent qu'il n'y aura qu'une seule livraison à la fois à l'hôpital Clocheville (noté Hcl). Ces contraintes sont valables pour des routes k_1 et k_1' utilisant des véhicules différents.

$$\forall k_1, k_1' \in \mathcal{M}_{inter}, k_1 \neq k_1', \forall t \in \tau : Ex_{k_1,k_1'}^t = 1 - Ex_{k_1',k_1}^t \tag{3.25}$$

$$\forall k_1, k_1' \in \mathcal{M}_{inter}, k_1 \neq k_1', \forall t \in \tau :$$
$$dep_{Hcl}^{k_1,t} \leq dep_{Hcl}^{k_1',t} - \sum_{p\in\mathcal{P}} tl_{Hcl,p} Qc_{Hcl,p}^{k_1',t} + HV(3 - Ex_{k_1,k_1'}^{t} - \sum_{i\in D_{\Phi(k_1)}\cup\mathcal{N}_{\Phi(k_1)}} x_{i,Hcl}^{k_1,t}$$
$$- \sum_{i\in D_{\Phi(k_1')}\cup\mathcal{N}_{\Phi(k_1')}} x_{i,Hcl}^{k_1',t}) \tag{3.26}$$

Les contraintes (3.25) définissent les relations entre variables d'exclusions de routes sur cet hôpital Hcl. Les contraintes (3.26) expriment les précédences entre routes sur ce même hôpital.

Nous allons maintenant définir l'ensemble des contraintes servant à affecter un chauffeur ou un manutentionnaire à chaque route et à respecter les successions de tournées pour une même personne.

$$\forall k \in \mathcal{M}, \forall t \in \tau : \sum_{r\in\mathcal{R}} \sum_{o\in\mathcal{O}} Liv_r^{k,o,t} \leq 1 \tag{3.27}$$

$$\forall r \in \mathcal{R}, \forall t \in \tau : \sum_{k\in\mathcal{K}} Liv_r^{k,1,t} \leq 1 \tag{3.28}$$

$$\forall k \in \mathcal{M}, \forall i \in \mathcal{N}_{\Phi(k)}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P} : \sum_{r\in\mathcal{R}} \sum_{o\in\mathcal{O}} Liv_r^{k,o,t} \geq IQc_{i,p}^{k,t} \tag{3.29}$$

$$\forall r \in \mathcal{R}, \forall t \in \tau, \forall o \in \mathcal{O} \setminus |\mathcal{O}| : \sum_{k\in\mathcal{M}} Liv_r^{k,o,t} \geq \sum_{k\in\mathcal{M}} Liv_r^{k,o+1,t} \tag{3.30}$$

$$\forall r \in \mathcal{R} : HV(1 - Ma_r) \geq \sum_{k_1\in\mathcal{M}_{inter}} \sum_{t\in\tau} \sum_{o\in\mathcal{O}} Liv_r^{k_1,o,t} \tag{3.31}$$

$$\forall r \in \mathcal{R} : HV\ Ma_r \geq \sum_{k_2\in\mathcal{M}_{intra}} \sum_{t\in\tau} \sum_{o\in\mathcal{O}} Liv_r^{k_2,o,t} \tag{3.32}$$

$$\forall k, k' \in \mathcal{M}, k \neq k', r \in \mathcal{R}, \forall o \in \mathcal{O}, \forall t \in \tau :$$
$$fin^{k,t} - dep_{D_{\Phi(k')}}^{k',t} \leq T_{max} + HV(2 - Liv_r^{k',1,t} - Liv_r^{k,o,t}) \tag{3.33}$$

$$\forall k, k' \in \mathcal{M}, (k \neq k'), \forall r \in \mathcal{R}, \forall o \in \mathcal{O} \setminus |\mathcal{O}|, \forall t \in \tau :$$
$$fin^{k,t} + d_{D_k,D_{\Phi(k')}} \leq dep_{D_{\Phi(k')}}^{k',t} + HV(2 - Liv_r^{k,o,t} - Liv_r^{k',o+1,t}) \tag{3.34}$$

Les contraintes (3.27 et 3.28) imposent que chaque route est affectée à au plus une tournée d'une seule personne. Les contraintes (3.29) imposent qu'une route non vide k est obligatoirement affectée à une tournée d'une personne. Les contraintes (3.30) définissent l'ordre des

tournées des personnes, les premières tournées d'une personne sont affectées à des routes, les dernières tournées peuvent ne pas être affectées. La définition des variables d'affectation des personnes en tant que chauffeur ou manutentionnaire est réalisée par les contraintes (3.31) et (3.32). Les contraintes (3.33) permettent le respect du temps de travail maximal T_{max} pour chaque personne. Enfin, ce sont les contraintes (3.34) qui définissent l'affectation de deux routes successives entre deux tournées à la suite pour une même personne. Cette personne peut éventuellement voyager entre deux dépôts.

3.2.3 Fonction objectif

Nous avons choisi comme première fonction objectif pour le PLNE, de maximiser le temps libre global des manutentionnaires afin de leur permettre d'effectuer d'autres tâches dans l'hôpital Bretonneau pour alléger le travail du personnel de soins. Nous considérons donc ici que le nombre de personnes (chauffeurs et manutentionnaires) est constant. Par conséquent, il s'agit de maximiser :

$$T_{\max} \sum_{r \in \mathcal{R}} Ma_r - \sum_{t \in \tau} \sum_{k_2 \in \mathcal{M}_{intra}} \sum_{i,j \in D_{\Phi(k)} \cup \mathcal{N}_{\Phi(k)} / i \neq j} d_{i,j}.x_{i,j}^{k_2,t} \tag{3.35}$$

Si nous avions choisi comme fonction objectif de minimiser la somme des retards des demandes à livrer ou collecter, il aurait fallu retirer les contraintes 3.13 et ajouter les contraintes suivantes :

$$\forall k \in \mathcal{M}, \forall i \in \mathcal{N}_{\Phi(k)}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P} : \quad dep_i^{k,t} - l_{i,p,t} \leq ret_{i,p,t} + HV(1 - IQc_{i,p}^{k,t}) \tag{3.36}$$

Avec $ret_{i,p,t} \geq 0$ des variables continues précisant chacune le retard d'une demande au point i en flux p le jour t. Et il aurait fallu minimiser :

$$\sum_{i \in \mathcal{H} \cup \mathcal{B}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in \tau} ret_{i,p,t} \tag{3.37}$$

Si nous avions choisi de minimiser la somme des dépassements des temps d'autonomie des chariots des repas, il aurait fallu retirer les contraintes 3.23 et 3.24 et ajouter les contraintes suivantes :

$$\forall k \in \mathcal{M}, \forall i \in \mathcal{N}_{\Phi(k)}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P} \text{ tel que } p \text{ est limité dans la durée de transport } :$$
$$dep_i^{k,t} - dep_{D_{\Phi(k)}}^{k,t} - g_p \leq aut_{i,p,t} + HV(1 - IQc_{i,p}^{k,t}) \tag{3.38}$$

$$\forall k_1 \in \mathcal{M}_{inter}, \forall k_2 \in \mathcal{M}_{intra}, \forall i \in \mathcal{N}_{\Phi(k_2)}, \forall t \in \tau, \forall p \in \mathcal{P} :$$
$$dep_i^{k_2,t} - dep_{D_{\Phi(k_1)}}^{k_1,t} - g_p \leq aut_{i,p,t} + HV(2 - IQc_{i,p}^{k_2,t} - IQtr_p^{k_1,k_2,t}) \tag{3.39}$$

Avec $aut_{i,p,t} \geq 0$ des variables continues précisant chacune le dépassement du temps d'autonomie des chariots d'une demande au point i en flux p le jour t. Et il aurait fallu minimiser :

$$\sum_{i \in \mathcal{H} \cup \mathcal{B}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in \tau} aut_{i,p,t} \tag{3.40}$$

En revanche, ce modèle suppose un nombre fixe de personnes et se contente de répartir les rôles. Pour minimiser le nombre d'intervenants, les modifications du PLNE, bien que possibles, semblent moins triviales.

3.2.4 Taille du PLNE

Le taille du PLNE est donné par :
- un nombre de variables binaires égal à :

$$|\mathcal{R}| + \tau.\Big(|\mathcal{M}_{inter}|.|\mathcal{M}_{intra}|.\big(1+|\mathcal{P}|\big) + |\mathcal{M}|.\Big(|\mathcal{O}|.|\mathcal{R}| + |\mathcal{A}|.\big(|\mathcal{A}|+|\mathcal{P}|\big)\Big)\Big)$$

- un nombre de variables entières égal à :

$$\tau.|\mathcal{P}|.\big(|\mathcal{M}|.|\mathcal{A}| + |\mathcal{M}_{inter}|.|\mathcal{M}_{intra}|\big)$$

- un nombre de variables continues égal à :

$$\tau.|\mathcal{M}|.\big(1+|\mathcal{A}|\big)$$

- un nombre de contraintes égal à :

$$2.|\mathcal{R}| + \tau.\Big(|\mathcal{A}|.|\mathcal{P}| + |\mathcal{R}|.\big(1+|\mathcal{O}|\big) + |\mathcal{M}_{inter}|.|\mathcal{M}_{intra}|.\Big(2+|\mathcal{P}|.\big(4+|\mathcal{A}|\big)\Big) + |\mathcal{M}|.\Big(5+2.|\mathcal{M}|.|\mathcal{R}|.|\mathcal{O}| + |\mathcal{P}| + |\mathcal{A}|.\big(2+8.|\mathcal{P}|+|\mathcal{A}|\big)\Big)\Big)$$

La taille des instances testées avec deux produits est donnée par le tableau 3.1.

τ	$\lvert\mathcal{A}\rvert$	$\lvert\mathcal{P}\rvert$	$\lvert\mathcal{R}\rvert$	$\lvert\mathcal{O}\rvert$	$\lvert\mathcal{M}\rvert$	$\lvert\mathcal{M}_{inter}\rvert$	$\lvert\mathcal{M}_{intra}\rvert$
1	17	2	5	6	36	18	18

TAB. 3.1 – Taille des instances testées

Nous obtenons donc pour ces instances un PLNE avec :
- 13 685 variables binaires,
- 1 872 variables entières,
- 648 variables continues,
- 113 767 contraintes.

L'évaluation expérimentale du PLNE est donnée section 3.5.2.

3.3 Algorithme génétique

Etant donné la complexité du problème, nous avons choisi d'utiliser une méta-heuristique pour le résoudre. La première méta-heuristique testée est un algorithme génétique (Holland [99]), méthode fréquemment utilisée dans les problèmes de tournées de véhicules. A

partir d'un ensemble de solutions initiales, ou population de N individus, elle consiste à faire évoluer cette population en utilisant des opérateurs de sélection, de croisement et de mutation. A chaque itération de l'algorithme, une nouvelle population de solutions ou d'individus est générée. Tout d'abord, un ensemble d'individus est sélectionné pour générer la population suivante. Ces individus sont ensuite croisés pour créer de nouveaux individus et compléter la nouvelle population. Certains de ces nouveaux individus peuvent subir une mutation. Le critère d'arrêt de l'algorithme dans notre cas est un nombre d'itérations sans amélioration de la meilleure solution trouvée ($\#ite$).

Algorithme 1 Structure générale de l'algorithme génétique

1: $\mathcal{P}_{courant} \leftarrow$ Initialiser une population de N individus
2: Evaluer chaque individu de $\mathcal{P}_{courant}$
3: $S_{best} \leftarrow$ Le meilleur individu $S \in \mathcal{P}_{courant}$
4: $I \leftarrow 0$
5: **Tant que** $I < \#ite$ **faire**
6: $\quad \mathcal{P}_{enfant} \leftarrow \emptyset$
7: $\quad$ **Pour** $j = 0$ à $j = N/2$ **faire**
8: $\quad\quad (P_1, P_2) \leftarrow$ Sélectionner deux individus parents de $\mathcal{P}_{courant}$
9: $\quad\quad (E_1, E_2) \leftarrow$ Croiser les deux parents (P_1, P_2) pour obtenir deux individus enfants
10: $\quad\quad \mathcal{P}_{enfant} \leftarrow \mathcal{P}_{enfant} \cup \{E_1, E_2\}$
11: $\quad$ **Fin pour**
12: $\quad$ Muter aléatoirement des individus de la population $\mathcal{P}_{enfant}$
13: $\quad \mathcal{P}_{courant} \leftarrow \mathcal{P}_{enfant}$
14: $\quad$ Evaluer chaque individu de $\mathcal{P}_{courant}$
15: $\quad$ **Si** il existe un individu $S \in \mathcal{P}_{courant}$ meilleur que S_{best} **alors**
16: $\quad\quad S_{best} \leftarrow S$
17: $\quad\quad I \leftarrow 0$
18: $\quad$ **Fin si**
19: $\quad I \leftarrow I + 1$
20: **Fin Tant que**

Les éléments importants d'un algorithme génétique sont le codage et l'évaluation d'un individu (étapes 2 et 14), l'initialisation d'une population (étape 1), la sélection (étape 8), le croisement (étape 9) et la mutation des individus (étape 12). Ces éléments sont décrits dans les pages qui suivent, dans le cadre de l'adaptation que nous en avons faite au problème de la logistique. Mais avant cela, il est important de noter que l'algorithme génétique proposé prend en paramètre deux grandeurs : NbT_{inter} et NbT_{intra} qui correspondent respectivement aux nombres de tournées Inter-hôpitaux (les camions) et intra-Bretonneau (les manutentionnaires) qui peuvent se dérouler simultanément. Les deux paramètres bornent supérieurement le nombre de chauffeurs et de manutentionnaires à $2.NbT_{inter}$ et $2.NbT_{intra}$ sans pour autant interdire à l'algorithme génétique de trouver des solutions avec moins d'employés (voir section 3.3.1.2 pour plus de détails).

3.3.1 Codage et évaluation d'un individu

Le codage d'une solution est avant tout basé sur l'affectation des demandes aux véhicules. Un individu est représenté par une liste ordonnée de gènes constitués de deux éléments (vec_i ;dmd_i) avec vec_i un numéro de véhicule et dmd_i un numéro de demande d'un gène i (cf. Figure 3.1 pour une illustration du codage). Cette liste de gènes est découpée en plusieurs segments, chaque segment représentant l'ensemble des demandes à traiter dans une même journée. A partir de ce codage, les tournées inter-hôpitaux des véhicules et intra-Bretonneau des manutentionnaires sont construites suivant deux procédures distinctes qui s'appliquent à chaque segment de manière identique. Un individu est évalué en fonction des retards des livraisons, des dépassements d'autonomies des chariots de l'UCPA et du nombre de chauffeurs et manutentionnaires nécessaires.

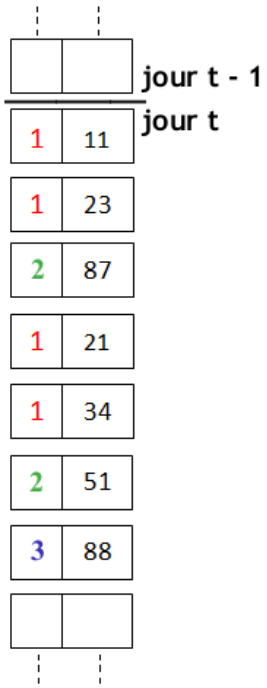


FIG. 3.1 – Illustration du codage

3.3.1.1 Détermination des tournées des véhicules

La première procédure détermine pour chaque journée les tournées des véhicules entre les hôpitaux. Les étapes suivantes sont appliquées tant qu'il reste des gènes à traiter dans le segment. Les gènes sont traités dans leur ordre d'apparition dans le segment. Soit (vec_i ;dmd_i) le gène courant :

- Si le véhicule vec_i n'est encore associé à aucune route, on en ouvre une nouvelle.
- On ajoute à la fin de la route associée au véhicule vec_i un sommet représentant l'hôpital dont est issue la demande dmd_i. Si la capacité restante du véhicule ne

permet pas d'accueillir tous les chariots représentant la demande dmd_i, on scinde cette demande en deux et on ouvre une autre route associée au véhicule vec_i avec le reliquat de chariots n'ayant pas pu être emmenés sur la route précédente.

– S'il n'est pas encore présent, le dépôt du flux associé à la demande dmd_i est inséré en début et en fin de route pour le chargement des chariots pleins et le retour des chariots vide (ou l'inverse dans le cas du flux de linge sale). On s'arrange pour placer le dépôt du véhicule en tout début et toute fin de route.

La figure 3.2 illustre cette première partie de la procédure. Nous supposons dans cet exemple qu'à partir de la demande 21, la capacité du véhicule est atteinte, c'est-à-dire que la quantité de chariots de la demande 21 est trop importante pour qu'elle loge entièrement dans le véhicule. Cette demande sera donc divisée en deux, une première partie des chariots sera livrée à la fin de la première tournée puis la seconde partie sera livrée au début de la deuxième tournée.

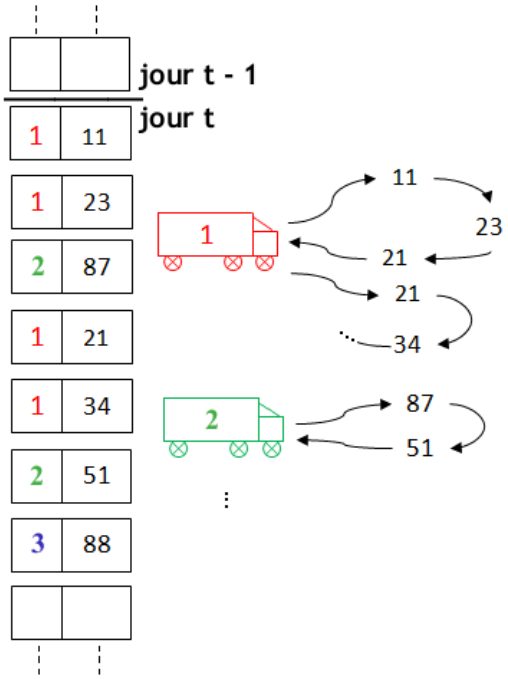


FIG. 3.2 – Illustration du codage

Les routes ainsi construites sont ensuite exploitées dans l'ordre dans lequel elles ont été créées :

– La date de départ d'un véhicule d'une route est calculée en fonction de sa précédente tournée, de la fenêtre de temps de la première demande (inutile de partir trop tôt), du temps de chargement des chariots à livrer ou collecter et du nombre de véhicules circulants au même moment. Une tournée peut être retardée si le nombre de véhicules circulants est égal à NbT_{inter}.

- les dates de livraisons/collectes de chaque demande sont ensuite déterminées en fonction de la date de départ du véhicule, des fenêtres de temps associées aux demandes, des durées de déchargement et chargement, des durées de livraison et des places disponibles sur les quais, dépendantes des précédentes routes calculées. Cette étape permet notamment de construire une liste des demandes à livrer à Bretonneau, triée par dates d'arrivées, ainsi qu'une autre liste pour les demandes à collecter.
- Une optimisation gloutonne est ensuite appliquée. Elle consiste à tester le déplacement de chaque sommet de la route vers toutes les places possibles. Un sommet est déplacé uniquement s'il améliore un des critères ci-dessous sans détériorer les autres. Les critères sont la durée totale de la tournée, les dates d'arrivée des demandes à Bretonneau (puisque les dates de livraison dans les bâtiments de Bretonneau ne sont pas connus à cette étape) et les retards des livraisons/collectes dans les hôpitaux autres que Bretonneau. Le meilleur déplacement pour chaque sommet est choisi en fonction d'abord de la diminution du retard engendré, puis par rapport aux dates d'arrivées des chariots sur le quai de Bretonneau et enfin en fonction de la diminution de la durée totale de la tournée.

3.3.1.2 Détermination de tournées des manutentionnaires

La seconde procédure détermine jour par jour les tournées des manutentionnaires au sein de l'hôpital Bretonneau. Rappelons que le nombre de manutentionnaires présent à un instant donné de la journée est borné par $2 \times NbT_{intra}$.

La liste des tournées des manutentionnaires est construite itérativement en utilisant prioritairement les fenwicks. Le principe général, basé sur la liste précédemment construite $\mathcal{L}$ des demandes à livrer triée par dates d'arrivées, est le suivant :

- Si un manutentionnaire est à quai, on crée la liste des chariots également à quai dont la date de livraison au plus tôt dans les services n'est pas trop éloignée de l'heure courante (moins de 45 minutes) et on trie cette liste par date de livraison au plus tard dans les services croissante et en cas d'égalité en regroupant par bâtiments.
- Si dans les minutes qui viennent on sait qu'un véhicule doit arriver au quai avec des chariots plus prioritaires, i.e. dont la date de livraison au plus tard dans les services est inférieure à celles des chariots de la liste, le manutentionnaire attend et les nouveaux chariots sont insérés en tête de liste. Le délai d'attente a été fixé à 10 minutes au maximum.
- Si la liste n'est pas vide, on affecte au manutentionnaire les premiers chariots (en fonction de la capacité et du moyen de transport qu'il peut prendre) et il débute sa tournée en livrant les chariots par ordre de priorité et en livrant en une seule fois tous les chariots d'un même bâtiment qu'il a emmené.

La collecte des chariots, notamment du linge sale et de la salubrité, pose un problème spécifique puisqu'il faut que les manutentionnaires aillent collecter les chariots dans les services pour les amener sur le quai avant le passage du véhicule chargé de les évacuer. La difficulté est de déterminer l'heure de départ des tournées des manutentionnaires. Pour résoudre ce

problème, les demandes à collecter sont converties en demandes à livrer fictives et ajoutées au préalable dans la liste $\mathcal{L}$. Les fenêtres de livraison dans les services de ces demandes fictives sont de la forme $[A\,;\,l_d]$, où l_d est l'heure d'arrivée du véhicule sur les quais moins le temps de trajet nécessaire pour aller du service au quai, et A est l'heure d'embauche des manutentionnaires. Ces fenêtres de temps sont considérées comme dures, aucune livraison ne doit être en retard. De plus, nous interdisons qu'une tournée de collecte de manutentionnaire se termine après le départ du véhicule de collecte. Cependant, l'heure d'embauche des manutentionnaires n'est pas une donnée du problème. Il faut donc calculer la valeur A en fonction de la liste $\mathcal{L}$ afin de déterminer toutes les routes intra sachant que toutes les demandes à collecter doivent être réalisées en temps et en heure. La valeur de A peut être bornée par la date au plus tôt d'embauche possible d'un manutentionnaire en réel et la date d'arrivée du premier chariot sur le quai. Grâce à cet encadrement, nous procédons par une recherche dichotomique pour trouver la meilleure valeur de A possible (une valeur trop petite nécessitera un grand nombre de manutentionnaires). Pour chaque valeur de A testée, nous calculons toutes les tournées des manutentionnaires, si les contraintes sur les chariots à collecter sont violées alors nous testons une valeur dans l'encadrement inférieur, sinon dans l'encadrement supérieur.

3.3.1.3 Dimensionnement des équipes

La dernière étape pour évaluer une solution est de déterminer le nombre de manutentionnaires et de chauffeurs nécessaires pour effectuer toutes les tournées précédemment calculées. Si les tournées sont considérées comme des tâches fixées (dates de début et de fin fixées), et les personnes comme des ressources, l'objectif est d'exécuter toutes les tâches en minimisant la quantité de ressources utilisées. De plus l'écart entre la date de fin de la dernière tâche d'une ressource et la date de début de sa première tâche doit être inférieur au temps de travail maximal d'une personne par jour (T_{max}). En considérant une unique journée, le problème est un problème NP-difficile intitulé "*The fixed job schedule problem with spread-time constraint*" déjà étudié dans la littérature (Fischetti et al. [72]). Mais ce problème doit en plus ici être résolu sur les cinq jours de la semaine, et chaque personne doit avoir les mêmes horaires chaque jour. Ce problème devant être résolu pour chaque individu généré, nous avons implémenté deux algorithmes rapides afin de déterminer une borne inférieure et supérieure du nombre de personnes nécessaires pour effectuer les tournées. Ces algorithmes sont exécutés indépendamment pour déterminer le nombre de manutentionnaires en fonction des tournées intra-Bretonneau, puis pour déterminer le nombre de chauffeurs en fonction des tournées inter-hôpitaux.

La borne supérieure est calculée par une heuristique gloutonne d'affectation des tournées. On dispose de 5 listes de tournées (une par jour) ordonnées par date de début croissante. La plus petite date de début, toutes journées confondues, définit la date de début de travail d'une personne, sa date de fin de travail étant donc T_{max} unitée de temps plus tard. On affecte ensuite pour chaque jour des tournées à cette personne, pour cela, jour par jour on prend les tournées dans l'ordre de la liste correspondante et si la personne peut effectuer la tournée on lui affecte et on la retire de la liste sinon on passe à la tournée suivante. On

recommence le processus jusqu'à ce que toutes les listes soient vides. Le nombre d'itérations est une borne supérieure du nombre de personnes nécessaires.

La borne inférieure est calculée à partir d'une courbe de charge maximale qui recouvre toutes les courbes de charges de chaque journée. L'idée directrice est d'annuler cette courbe de charge en lui retirant itérativement des rectangles correspondants à la charge de travail d'une personne sur une journée (T_{max}). Soit $C_0(t)$ cette courbe de charge maximale à l'étape 0, une nouvelle courbe de charge $C_i(t)$ est calculée à chaque étape i de l'algorithme suivant :

1 $\quad \delta_i = min\{t/C_{i-1}(t) \neq 0\}$

2 $\quad C_i(t) = \begin{cases} 0 \text{ si } t < \delta_i \\ max(0; C_{i-1}(t) - 1) \text{ si } \delta_i \leq t < \delta_i + T_{max} \\ C_{i-1}(t) \text{ si } \delta_i \geq \delta_i + T_{max} \end{cases}$

L'algorithme se termine lorsque $\forall t, C_i(t) = 0$ et la borne inférieure est égale au nombre d'itérations effectuées. Cet algorithme permet de trouver des solutions en considérant que les tournées peuvent être préemptées.

3.3.1.4 Evaluation d'un individu

Comme pour la plupart des problèmes de tournées de véhicules avec des fenêtres de temps, il est difficile de générer uniquement des solutions respectant ces fenêtres (sans retard). L'une des méthodes classiques pour palier cette difficulté est de relâcher cette contrainte et de considérer le retard comme un critère dans la fonction objectif. De plus la contrainte des fenêtres de temps dépend de chaque service de l'hôpital, si une bonne solution est trouvée mais qu'elle possède un retard important sur une demande d'un service, il est envisageable de revoir la fenêtre de temps de cette demande en discutant avec le service concerné. D'autant plus que les fenêtres de livraisons dont nous disposons sont celles actuellement utilisées, il n'y a pas été possible de se renseigner auprès de chaque service du CHRU pour connaître leurs souhaits.

L'évaluation d'un individu doit donc tenir compte de plusieurs critères : (1) la somme des retards des demandes à livrer ou collecter, (2) la somme des dépassement des temps d'autonomie des chariots des repas et (3) l'estimation du nombre de manutentionnaires et de chauffeurs nécessaires (moyennes entre les bornes inférieures et supérieures). Le choix qui a été fait pour tenir compte de ces critères a été de considérer une combinaison linéaire. Nous noterons $Eval_i$ l'évaluation d'un individu i.

3.3.2 Initialisation d'une population

La population initiale est constituée de N individus générés aléatoirement selon la procédure suivante :

- Découper la période considérée τ (5 jours de la semaine) en demi-journées.
- Pour les demandes attribuées à un jour particulier, affecter chaque demande dont l'intersection entre la fenêtre de temps correspondante et la demi-journée est la plus

grande parmi les deux demi-journées concernées.
- Affecter aléatoirement les autres demandes (non attribuées à un jour) aux demi-périodes.
- Enfin, pour chaque demi-journée :
  - Trier aléatoirement les demandes affectées à cette demi-journée.
  - Et affecter un numéro de véhicule pour chaque demande et de manière équiprobable.

3.3.3 Sélection des individus

Trois types d'opérateurs de sélection ont été implémentés pour choisir dans la population courante les individus qui donneront par croisement la population suivante :
- Le premier opérateur sélectionne les 50% meilleurs individus de la population. Des couples d'individus parents sont ensuite constitués aléatoirement de manière à ce que chaque individu soit sélectionné exactement deux fois.
- Le deuxième opérateur est une sélection probabiliste de type roulette avec la possibilité de sélectionner plusieurs fois le même individu. Dans ce cas, les meilleurs individus ont plus de chance d'être sélectionnés par rapport au moins bon individus. Chaque individu i a une probabilité de sélection P_i^{select} telle que :

$$P_i^{select} = \frac{max_{j \in \mathcal{P}}(Eval_j) - Eval_i}{N \times max_{j \in \mathcal{P}}(Eval_j) - \sum_{j \in \mathcal{P}} Eval_j}$$

- Le dernier opérateur sélectionne les individus par tournois deux à deux. Le meilleur des deux individus choisis aléatoirement est sélectionné. Comme pour le précédent opérateur de sélection, un individu peut être sélectionné plusieurs fois.

3.3.4 Croisement des individus

Une fois les deux individus parents sélectionnés, deux types d'opérateurs de croisement sont utilisés pour créer deux individus enfants. Ces opérateurs portent uniquement sur des segments de chromosomes pris aléatoirement mais appartenant à la même journée. Le premier type de croisement est effectué à partir d'un opérateur de recopie (cf. figure 3.3), aussi appelé *Partially Mapped Crossover* (Goldberg [89]). Cet opérateur consiste à recopier un segment d'un parent P2 dans un individu enfant E1 et à compléter cet individu E1 par les demandes du parent P1 dans l'ordre de leurs apparitions dans le chromosome et en évitant les doublons. Lorsqu'une demande d apparaît en double, elle est remplacée par la demande d' telle que la demande d du segment P2 correspond à l'emplacement de d' dans P1. Par exemple, dans la figure 3.3, la demande 11 a été remplacée par la demande 21.

Le deuxième opérateur est un opérateur de type insertion (cf. exemple Figure 3.4). Pour générer le premier enfant, un groupe de gènes consécutifs du premier parent est d'abord sélectionné. Puis un point d'insertion dans le deuxième parent est choisi. Et le premier enfant correspond à l'insertion du groupe de gènes au point d'insertion et à la suppression des gènes en doublon dans le deuxième parent. Le second enfant est créé de la même manière

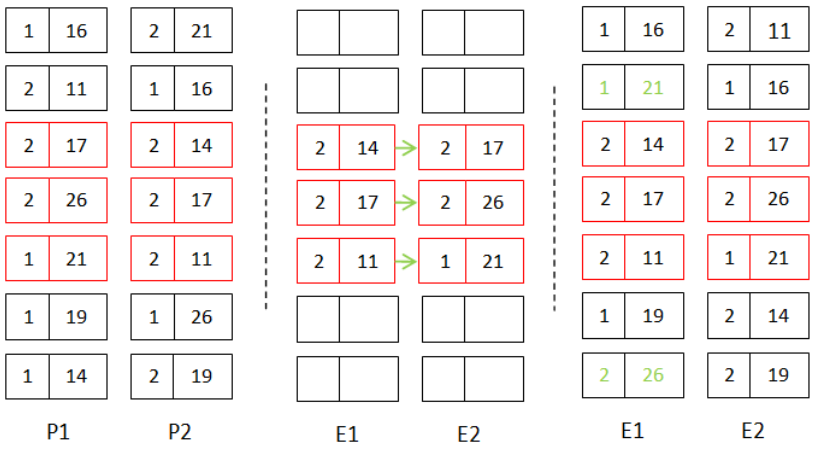


FIG. 3.3 – Partially Mapped Crossover

en inversant les parents.

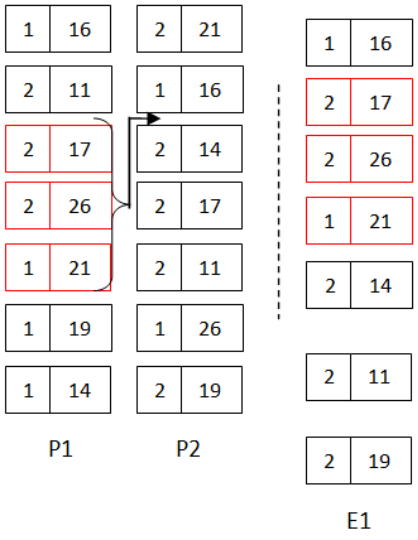


FIG. 3.4 – Opérateur insertion

3.3.5 Mutation des individus

Chaque individu a une probabilité faible P_{mut} de subir une mutation. Dans ce cas, il existe deux possibilités de mutation :

- La mutation de véhicule qui modifie le numéro de véhicule d'un gène tiré au hasard.
- La mutation de place d'un gène qui avance ou recule dans un segment un gène sélectionné aléatoirement suivant que la demande associée au gène est en retard ou non.

Les résultats de l'algorithme génétique sont présentés en section 3.5.3.1.

3.4 Recherche tabou

La deuxième méta-heuristique développée pour résoudre notre problème est une recherche tabou ([88] et [95]). La structure générale de la méthode est décrite par l'algorithme 2. Le critère d'arrêt de l'algorithme est à nouveau un nombre maximal d'itérations sans amélioration de la meilleure solution connue.

Algorithme 2 Structure générale de l'algorithme tabou

1: $S_{courant} \leftarrow$ Générer aléatoirement une solution initiale
2: $S_{best} \leftarrow S_{courant}$
3: $I \leftarrow 0$
4: **Tant que** $I < \#ite$ **faire**
5: $\quad \Psi \leftarrow$ Calculer le voisinage non tabou de la solution $S_{courant}$
6: $\quad S_{courant} \leftarrow$ Meilleure solution du voisinage Ψ
7: $\quad$ Stocker le mouvement dans la liste tabou
8: $\quad$ **Si** $S_{courant}$ est meilleur que S_{best} **alors**
9: $\quad\quad S_{best} \leftarrow S$
10: $\quad\quad I \leftarrow 0$
11: $\quad$ **Fin si**
12: $\quad I \leftarrow I + 1$
13: **Fin Tant que**

Les éléments importants de l'algorithme tabou sont : le codage et l'évaluation d'une solution, la construction d'une solution initiale, l'opérateur de voisinage et la liste tabou. Nous allons décrire par la suite chaque élément, à l'exception du codage et de l'évaluation d'une solution, qui restent inchangés par rapport à l'algorithme précédent.

3.4.1 Construction d'une solution initiale

La méthode tabou commence la recherche par une solution initiale générée selon les étapes suivantes :

- Pour toutes les demandes qui ne sont pas affectées à un jour fixe, le jour est choisi de manière aléatoire en essayant d'équilibrer la charge des chariots à livrer ou collecter chaque jour. Ensuite, pour chaque jour t, les demandes sont triées par $l_{i,p,t}$ croissant (date de livraison souhaitée au plus tard).
- L'affectation de chaque demande au véhicule est réalisée comme suit :
  - Les véhicules sont triés dans une liste par capacité décroissante.
  - Tant qu'il reste des demandes non encore affectées à un véhicule :
    - Le premier véhicule k de la liste est retiré.
    - Les premières demandes non affectées sont attribuées au véhicule k jusqu'à atteindre la capacité maximale du véhicule.
    - Enfin, le véhicule k est réinséré à la fin de la liste des véhicules, pour une utilisation ultérieure dans la journée.

3.4.2 Opérateur de voisinage

Le voisinage d'une solution courante est construit avec deux types d'opérateurs de voisinages. Le premier consiste à changer le numéro du véhicule chargé du transport d'une demande dans la solution considérée, par un autre véhicule qui peut réaliser cette demande. Le second opérateur de voisinage consiste à déplacer une demande de la solution vers le haut. Dans ce cas, le nombre de mouvements testés est limité à une valeur préfixée, notée Op_{mov}. Si la demande n'est pas assignée à un jour particulier, les différents tests des mouvements porteront aussi sur les autres jours.

Pour construire le voisinage d'une solution, l'opérateur de voisinage est tout d'abord sélectionné pour être appliqué à la demande qui souffre du plus grand retard de livraison. L'opérateur est sélectionné de manière probabiliste de sorte que lorsqu'il améliore la solution courante, sa probabilité de sélection augmente, et dans le cas contraire sa probabilité diminue. Soit Suc_1 le nombre de fois que l'opérateur 1 a amélioré la solution courante plus le nombre de fois que l'opérateur 2 n'a pas amélioré la solution courante, et respectivement Suc_2 pour l'opérateur 2. L'opérateur de voisinage 1 a une probabilité d'être sélectionné égale à $Suc_1/(Suc_1 + Suc_2)$ (pour l'opérateur 2, elle est de $Suc_2/(Suc_1 + Suc_2)$). Au départ de l'algorithme, $Suc_1 = Suc_2 = 1$.

Si aucune des demandes qui ne sont pas interdites par la liste tabou n'est en retard, alors la demande dont les chariots arrivent le plus en avance au point de livraison est sélectionnée. Dans ce cas, l'opérateur de mouvement déplace la demande sélectionnée vers le bas.

3.4.3 Liste tabou

La liste tabou est constituée des couples : (type d'opérateur de voisinage ; numéro de demande sélectionnée). Tout mouvement d'une solution courante vers une autre utilisant ce type d'opérateur sur cette demande est interdit pendant un nombre d'itérations égal à la taille de la liste tabou notée T_{lt}. Cette liste tabou permet d'éviter de toujours se focaliser sur la même demande en retard.

3.5 Résultats expérimentaux

Avant de tester les algorithmes développés pour le problème de logistique sur des instances réelles, nous avons généré aléatoirement des instances en respectant les hypothèses de départ (cf. section 3.1) et dont les caractéristiques sont inspirées de l'activité réelle de la logistique au sein du CHRU, voire identique pour tous les éléments concernant la structure du CHRU (hôpitaux, bâtiments, dépots, quais et services), les moyens de transports (types, quantités et capacités) et les demandes sur lesquelles nous avions des informations précises. Le langage utilisé pour l'implémentation est le $C++$. L'ordinateur utilisé est un Pentium(R) 4 CPU 3.00 GHz, 1.00 Go de RAM et le solveur utilisé pour le PLNE est CPLEX version 10.

3.5.1 Génération d'instances

Etant donné l'ampleur de la collecte de données à réaliser (pour chaque service, relever les quantités des chariots commandées par produit, les temps de livraison, etc.), le CHRU n'a pas encore fini de fournir toutes les données réelles. Les données les plus délicates à collecter sont les quantités des chariots demandées et les fenêtres de temps des demandes. Cependant, pour certaines logistiques (Logistique Hôtelière et pharmacie), nous avons une estimation très fine des quantités de chariots livrées par service. Pour les autres logistiques, les quantités de chariots ont été données "à la louche" par le personnel concerné du CHRU mais peuvent être retrouvées ou confirmées en analysant les tournées actuelles. Les fenêtres de livraison des services sont plus difficiles à connaître. Elles dépendent fortement des services sauf pour certains flux où elles sont clairement connues, comme les repas. Soit nous avons pu obtenir des estimations de ces fenêtres de temps soit nous nous sommes basés sur les tournées actuelles.

En se basant sur quelques données réelles fournies par le CHRU et l'étude complète des flux (cf. Annexe A), nous avons créé dans un premier temps une instance théorique aussi réaliste que possible. Les caractéristiques principales de cette instance sont les suivantes :

- L'ensemble $\mathcal{D}$ est constitué de 4 dépôts (logipôle, Blanchisserie, Salubrité à Bretonneau et les Archives près de Trousseau).
- L'ensemble $\mathcal{H}$ est composé non pas de 6 mais de 9 hôpitaux (Trousseau 1, Trousseau 2, Trousseau 3, Bretonneau, Clocheville 1, Clocheville 2, Ermitage, CPTS, et CPU). En effet, dans la résolution du problème, les demandes des hôpitaux autres que Bretonneau sont groupées car seuls les horaires de passages des camions en ces lieux nous intéressent. Il est indispensable de connaître ces dates de passages pour assurer la synchronisation des tournées des véhicules et des manutentionnaires au quai de Bretonneau. Ces demandes groupées sont trop volumineuses par rapport aux capacités des véhicules. C'est pour cela que les hôpitaux Trousseau et Clocheville ont été divisés en plusieurs points de livraison (hôpitaux virtuels). Cela permet d'améliorer la granularité de l'approche.
- L'ensemble $\mathcal{B}$ est constitué de 8 bâtiments à Bretonneau.
- la période de planification τ est de 5 jours, les demandes affectées au sixième jour sont celles qui ne sont pas assignées à jour fixe dans la semaine.
- L'ensemble $\mathcal{P}$ est composé de 11 types de chariots ou flux (LH, Pharmacie, repas du midi, repas du soir, linge propre 1, linge propre 2, linge sale 1, linge sale 2, la stérilisation, les dossiers patients, et les déchets). Pour la même raison que les hôpitaux, le flux de linge propre et de linge sale sont divisés de manière à obtenir une granularité plus fine (la quantité des chariots demandée en linge étant plus élevé par rapport aux autres flux). Il y a donc 3 types de chariots à collecter et 8 à livrer.
- L'ensemble des véhicules $\mathcal{V}$ est constitué de 16 camions dont la capacité peut varier entre 12 et 21 chariots (selon le volume et le poids des chariots et le type de véhicules).
- Il y a au total 3 fenwicks ($\mathcal{F}int = 2$ et $\mathcal{F}ext = 1$). Nous avons l'estimation du poids moyen d'un chariot par flux. Suivant les chariots à emmener, les fenwicks intérieurs peuvent tracter en moyenne 5 chariots, alors que le fenwick extérieur peut en tracter en moyenne 6. Les fenwicks permettent de se déplacer deux fois plus vite qu'à pied.

– L'ensemble $\mathcal{R}$ est composé de 25 personnes à répartir entre l'équipe des chauffeurs et celle des manutentionnaires. Un manutentionnaire peut tracter en moyenne 2 chariots.

Cette instance compte au total 631 demandes. Les temps de chargement et déchargement, le temps de livraison/collecte suivant les flux et le point de livraison, le nombre de places par quais d'hôpital, l'ensemble des produits transportables suivant le moyen de transport, ainsi que les durées de déplacements entre hôpitaux et au sein de Bretonneau sont celles fournies par le CHRU. Pour les quelques flux dont le CHRU nous a fourni les distributions empiriques du nombre de chariots demandés, nous avons retenu pour chaque service une valeur haute du nombre de chariots (correspondant à une probabilité cumulée de l'ordre de 90%). Pour les autres flux, nous nous sommes basés sur les tournées existantes pour estimer le nombre de chariots constituant chaque demande. De même, les fenêtres de livraison ont été définies à partir des tournées actuelles, elles sont de l'ordre de la demi-journée pour la plupart des flux et de l'ordre de deux heures pour les plateaux repas. Les collectes de linge sale et des déchets sont prévues en début de matinée.

Pour réaliser les tests, cent instances ont été construites à partir de l'instance théorique précédemment décrite, en faisant varier aléatoirement les quantités de chariots demandés de plus ou moins 1 ou plus ou moins 2, suivant que le nombre théorique est inférieur ou supérieur à 8. Un maximum de 2182 chariots peut être à livrer ou à collecter dans une même instance. Les fenêtres de temps sont également modifiées aléatoirement, la date de livraison au plus tôt est retardée d'au plus une heure et demie et la date de livraison au plus tard est décalée de plus ou moins une heure au maximum, en conservant bien sûr la cohérence entre les deux dates.

3.5.2 Résultats pour le PLNE

Nous avons voulu tester dans un premier temps le PLNE avec Cplex. Cependant, le nombre de variables et de contraintes est beaucoup trop important pour tester sur des instances détaillées précédemment. De manière à tester sur des instances raisonnables pour le solveur, nous avons limité la période de planification à une journée, le nombre de véhicules à 9, le nombre de personnes à 5 et le nombre de types de produits à 2 maximum. Nous considérons que les produits sont (a) livrés ou (b) collectés ou (c) livrés avec une autonomie de transport.

Pour les instances considérant un seul produit (à livrer uniquement), sur 6 instances, le modèle ne trouve pas de solution réalisable pour une instance et retourne une solution réalisable en moyenne en 211 secondes (au plus en 729 secondes). Pour les instances à deux produits (cas (a), (b) ou (c)), 18 instances ont été testées. 3 instances demeurent non résolues au bout de 2500 secondes. Pour les autres instances, une solution réalisable est trouvée en moyenne en 635 secondes (au plus en 1522 secondes). Nous avons été également confrontés au problème de l'occupation de l'espace mémoire vive lorsque nous avons voulu augmenter la taille des instances. Très vraisemblablement, ce modèle ne pourra pas résoudre des instances sur plus d'une journée. En revanche, le modèle semble bien se com-

porter si on augmente le nombre de demandes.

Nombre d'instances	Nombre de produits cas (a)	cas (b)	cas (c)	Temps moyen (s)	Nombre d'instances sans solution réalisable
6	1	0	0	211,2	1
6	2	0	0	512,6	1
6	1	0	1	726,2	1
6	1	1	0	667,0	0

TAB. 3.2 – Résultat pour le PLNE

3.5.3 Résultats pour les méta-heuristiques

3.5.3.1 L'algorithme génétique

Des tests préliminaires ont montré qu'une suite de cent itérations sans amélioration ($\#ite$) constitue un critère d'arrêt satisfaisant, la taille de population a été fixée à $N = 100$ et la probabilité de mutation P_{mut} à 25%, un des deux opérateurs de mutation étant alors choisi de façon équiprobable. Nous nous sommes ensuite surtout préoccupés de l'influence de l'opérateur de sélection (sélection des 50% meilleurs (M), sélection par roulette (R) et sélection par tournois (T)) et de l'influence de l'opérateur de croisement (par recopie (C) ou par insertion (I)). Un couple (sélection, croisement) est appelé une configuration. Deux autres paramètres importants sont le nombre de tournées inter-hôpitaux NbT_{inter} et intra-hôpital NbT_{intra} pouvant se dérouler au même moment. Ils ont été fixés à $NbT_{inter} = 5$ et $NbT_{intra} = 7$.

Chacune des six configurations sélection-croisement a été testée sur les 100 instances générées afin de les comparer entre elles. Les résultats sont résumés dans le tableau 3.3. Δ_i est la moyenne sur toutes les instances des écarts relatifs de la solution trouvée par la configuration i à la meilleure solution trouvée par l'ensemble des 6 configurations, l'écart type est indiqué par $\sigma(\Delta_i)$. Nb_{min} est le nombre de fois où la configuration i trouve la meilleure solution. Tps indique le temps moyen de résolution en secondes et Nb_{eval} représente le nombre moyen en milliers d'appels à la fonction d'évaluation d'un individu.

L'opérateur de croisement I semble être plus performant que l'opérateur C quelque soit l'opérateur de sélection. Tandis que l'opérateur de sélection R est le moins performant. De plus, les deux combinaisons de cet opérateur I avec les opérateurs M et T dominent les autres configurations.

Le tableau 3.4 confirme la dominance des configurations (I,M) et (I,T) sur les autres configurations. Il présente une moyenne sur les 100 instances de la fonction objectif, de la somme des retards en minutes, de la somme des dépassements des autonomies des chariots repas, des bornes inférieure et supérieure du nombre de manutentionnaires, des bornes in-

Crois.	C	I	C	I	C	I
Sélec.	M	M	R	R	T	T
Δ_i (%)	46,1	29,0	67,2	66,3	40,9	29,4
$\sigma(\Delta_i)$	25,7	28,1	20,6	18,7	26,2	29,8
Nb_{min}	10	31	5	2	19	33
Tps (s)	606	736	371	411	585	803
Nb_{eval}	33,1	40,1	20,3	22,7	32,1	43,9

TAB. 3.3 – Résultat pour l'AG

férieure et supérieure du nombre de chauffeurs, du nombre de demandes en retard et du nombre de demandes en chariot repas pour lesquelles l'autonomie d'au moins un chariot a été dépassée. Nous pouvons également noter que lors de l'évaluation d'une solution, la différence entre la borne supérieure et la borne inférieure est égale dans la plupart des cas à une personne seulement pour le calcul du nombre de manutentionnaires, et à deux personnes pour le calcul du nombre de chauffeurs.

Crois.	C	I	C	I	C	I
Sélec.	M	M	R	R	T	T
Fonction objectif	5831	4153	9700	9098	5524	4182
Somme des retards	4920	3405	8434	7968	4629	3444
Somme des dépassements des autonomies	655	494	1003	868	637	483
Borne inférieure (manutentionnaires)	14,42	14,19	14,71	14,72	14,35	14,37
Borne supérieure (manutentionnaires)	14,89	14,93	15,12	15,18	15	14,92
Borne inférieure (chauffeurs)	9,78	9,76	10,04	9,98	9,88	9,72
Borne supérieure (chauffeurs)	12,12	11,9	12,69	12,48	12,35	11,9
Nombre de demandes en retard	60,79	52,49	82,55	80,21	56,89	52,44
Nombre de demandes avec autonomie dépassée	7,8	7,03	9,7	8,96	7,84	7,07

TAB. 3.4 – Résultats des six configurations de l'AG

Sur l'instance théorique, l'algorithme génétique (N=100, I, M) a fourni une solution constituée de 154 tournées inter-hôpitaux avec 10 chauffeurs et 14 manutentionnaires, pour un cumul de 25 autorisé. Il y a 68 demandes en retard sur 631 pour une somme totale de 1468 minutes de retard. Néanmoins, la configuration (I,M) conduit probablement à une convergence de la population trop rapide. Pour éviter le phénomène de "super individu",

Op_{mov}	20	40	60	20	40	60	20	40	60
T_{lt}	20	20	20	15	15	15	10	10	10
$\Delta_i(\%)$	46,9	49,2	48,7	45,9	44,7	42,4	47,1	42,2	46,8
$\sigma(\Delta_i)(\%)$	22,4	21,5	22,2	22,6	25,9	22,8	22,6	24,7	22,1
Nb_{min}	6	4	8	8	11	8	5	12	6
$Tps(s)$	66,3	107,9	146,5	61,1	107,7	137,6	68,1	104,8	142,4
$Nb_{\Delta\leq 10}$	9	8	8	10	16	9	10	16	6
$Nb_{\Delta\leq 20}$	14	14	14	16	21	20	14	23	14

Op_{mov}	20	40	60	20	40	60
T_{lt}	5	5	5	0	0	0
$\Delta_i(\%)$	45,9	46,2	44,2	53,8	54,5	53,4
$\sigma(\Delta_i)(\%)$	23,1	23,7	26,5	21,9	21,3	22,4
Nb_{min}	7	6	11	1	2	5
$Tps(s)$	66,7	102,8	139,6	79,0	136,1	168,1
$Nb_{\Delta\leq 10}$	9	9	20	5	6	7
$Nb_{\Delta\leq 20}$	19	16	24	8	8	10

TAB. 3.5 – Résultats pour la recherche tabou

d'autres tests seront effectués pour tous ces opérateurs de sélection sans en écarter pour l'étude suivante (voir chapitre 4 : Modèle appliqué).

3.5.3.2 La recherche tabou

Après quelques tests préliminaires, le nombre maximum d'itérations sans amélioration de la meilleure solution a été fixé à 100. Pour les paramètres : taille de la liste tabou (T_{lt}) et taille de l'opérateur de voisinage de type déplacement d'une demande (Op_{mov}), nous avons testé différentes combinaisons. Le tableau 3.5 présente pour les 100 instances générées les mêmes indicateurs que pour les tests de l'algorithme génétique : la moyenne Δ_i des écarts relatifs entre la meilleure solution trouvée pour toutes les combinaisons et la meilleure solution trouvée par la configuration i, l'écart type $\sigma(\Delta_i)$, le nombre d'instances pour lesquelles la combinaison i trouve la meilleure solution (Nb_{min}) et le temps moyen de résolution en secondes (Tps). Pour une comparaison plus fine, nous avons ajouté le nombre d'instances pour lesquelles l'écart relatif est inférieur à 10% ($Nb_{\Delta\leq 10}$) et 20% ($Nb_{\Delta\leq 20}$).

Les résultats ont en moyenne des écarts relatifs importants car les meilleures solutions trouvées parmi toutes les meilleures combinaisons ont une petite valeur. Les résultats montrent globalement peu de différences. Néanmoins, nous pouvons remarquer que trois combinaisons semblent dominer les autres : ($Op_{mov} = 40, T_{lt} = 15$), ($Op_{mov} = 40, T_{lt} = 10$) et ($Op_{mov} = 60, T_{lt} = 5$), pour un temps de résolution à peu près similaire. Nous nous sommes donc intéressé à ces trois combinaisons et avons relevé la moyenne sur 100 instances de la fonction objectif, de la somme des retards en minutes, de la somme des dépassements des autonomies des chariots repas, des bornes inférieure et supérieure du nombre de manu-

tentionnaires, des bornes inférieure et supérieure du nombre de chauffeurs, du nombre de demandes en retard et du nombre de demandes en chariot repas pour lesquelles l'autonomie d'au moins un chariot a été dépassée. Le tableau 3.6 présente ces résultats. Ces trois combinaisons permettent de trouver des solutions avec en moyenne très peu de demandes en retard, entre 4 et 7. Le nombre de personnes total varie en moyenne entre 23 et 26. Parmi ces trois combinaisons, celle où $Op_{mov} = 40$ et $T_{lt} = 10$ paraît le meilleur compromis puisqu'elle possède des valeurs moyennes de ces indicateurs sensiblement inférieures ou proche des minimums par rapport aux deux autres. Nous pouvons remarquer également que la somme des retards de livraisons/collectes est nettement inférieure à la somme des dépassements d'autonomie des transports de chariots. Ce phénomène s'explique facilement par le choix de la demande sur laquelle l'opérateur de voisinage va travailler. Il s'agit la demande la plus en retard sans tenir compte des autonomies des chariots. L'une des améliorations possibles de cet algorithme tabou est de prendre en compte ces dépassements dans le choix de la demande.

Op_{mov}	40	40	60
T_{lt}	15	10	5
Fonction objectif	709,57	639,17	682,72
Somme des retards	102,47	65,17	60,96
Somme des dépassements des autonomies	359,4	326,65	374,81
Borne inférieure (manutentionnaires)	13,75	13,69	13,78
Borne supérieure (manutentionnaires)	14,57	14,63	14,75
Borne inférieure (chauffeurs)	9,28	9,48	9,29
Borne supérieure (chauffeurs)	11,94	11,67	11,57
Nombre de demandes en retard	6,86	5,69	5,68
Nombre de demandes avec autonomie dépassée	4,98	4,87	5,57

TAB. 3.6 – Résultats des trois combinaisons

3.5.3.3 Comparaison des deux méta-heuristiques

En comparant les tableaux 3.4 et 3.6, la recherche tabou trouve en moyenne des solutions cinq fois meilleures que l'algorithme génétique en un temps de résolution six fois plus petit. Elle permet aussi de trouver des solutions avec une personne en moins par rapport à l'algorithme génétique. La recherche tabou est donc incontestablement la meilleure méthode pour converger rapidement vers une très bonne solution. Néanmoins, l'algorithme génétique

permet de trouver N solutions différentes alors que la recherche tabou n'en trouve qu'une. Ce point n'est pas à négliger puisque l'objectif de l'étude du projet est aussi de tester par la suite des solutions différentes trouvées par les algorithmes avec un simulateur pour étudier leurs robustesses dans un environnent aléatoire (quantité de chariots variables, distance en temps non constant, etc.). L'une des perspectives de ce travail a donc été d'hybrider ces deux méthodes de manière à obtenir plusieurs bonnes solutions différentes. De plus, contrairement à l'algorithme pour le problème de transports de patients, nous ne sommes pas contraints par le temps de résolution. Une autre perspective est donc d'augmenter le nombre d'itérations sans amélioration pour les deux méthodes et d'observer laquelle des deux méthodes continu à converger vers de meilleures solutions. Enfin, dans cette première modélisation, toutes les contraintes ne sont pas prises en compte, ces perspectives ont donc été réalisées pour le modèle appliqué.

3.6 Conclusion

Pour cette première étude de la logistique, le problème a été abordé de manière théorique sans prendre en compte les contraintes de temps de préparation ou production des chariots ni de distinction des types de quais. Un modèle de PLNE a été présenté mais il ne permet pas de résoudre des instances réelles, étant donné la complexité importante du problème. Deux autres méthodes de résolution se basant sur le même codage d'une solution ont été développées : un algorithme génétique et une recherche tabou. Des résultats expérimentaux préliminaires sur ces deux méthodes ont montré que la recherche tabou est plus performante que l'algorithme génétique.

Suite à cette première étude outre le fait d'intégrer des contraintes représentant plus finement la réalité, un ensemble de perspectives ont été établies. Une des premières perspectives est de tester une hybridation des deux méthodes. Une seconde est d'approfondir les tests en augmentant le nombre d'itérations sans amélioration. Enfin, une dernière amélioration possible concerne l'opérateur de voisinage de l'algorithme tabou, afin de prendre en compte les dépassements des autonomies des chariots dans le choix de la demande.

Un certain nombre d'hypothèses posées au tout début de cette étude exploratoire sont à revoir. En premier lieu, l'hôpital Bretonneau subit d'importants travaux de transformation (destruction de certains bâtiments et construction de nouveaux). Ce n'est qu'à la fin de ces travaux que l'on pourra effectivement s'appuyer sur le quai unique. Pendant cette période transitoire, d'autres quais, liés à des bâtiments isolés doivent être utilisés par les véhicules. D'autre part les manutentionnaires, à terme, ne pourront utiliser que les fenwicks sous-terrains ou se déplacer à pied dans les bâtiments (il n'y aura pas de déplacements en extérieur). Actuellement, les collectes de linge sale et de déchets sont assurées par une équipe de salubrité déjà existante et le CHRU ne souhaite pas désorganiser cette équipe, les manutentionnaires ne s'occuperont donc pas de ces flux, par contre, les véhicules devront prendre en charge le linge sale. Ces considérations, ainsi que quelques autres présentées dans le chapitre suivant nous ont amené à enrichir la modélisation et à proposer un modèle plus appliqué.

Chapitre 4

Optimisation des tournées et dimensionnement des équipes : Modèle appliqué

Dans ce chapitre, nous nous intéressons de nouveau au problème d'optimisation des tournées des véhicules de la logistique du CHRU, en considérant des hypothèses émises par le service de la logistique et d'autres contraintes rendant le problème plus proche de la réalité du terrain. Le tableau 4.1 résume les différences entre le modèle exploratoire qui vient d'être présenté dans le chapitre précédent et le modèle appliqué présenté dans ce chapitre. Dans ce modèle appliqué, les hypothèses ont permis de simplifier certains points. Elles ont été formulées pour obtenir des plannings des tournées les plus réalistes possibles. Une première section de ce chapitre présente ces nouvelles contraintes et hypothèses. Les algorithmes précédents ont été modifiés en fonction de ces nouveaux éléments et des perspectives d'amélioration établies dans le chapitre précédent ([119] et [122]). Ces modifications sont présentées dans une deuxième section. Puis une troisième section est dédiée à une nouvelle méthode de résolution : un algorithme mémétique [118]. Enfin, une dernière section est consacrée aux résultats expérimentaux sur la résolution de ce modèle appliqué par les trois algorithmes.

4.1 Contraintes et hypothèses du modèle appliqué

Tout d'abord, la première évolution du modèle concerne les tournées de collecte des chariots (linge sale et salubrité). A l'exception de Bretonneau, les tournées de collecte peuvent être vues comme des tournées de livraison fictives de chariots vides, sachant qu'une personne dépose autant de chariots vides qu'elle collecte de chariots pleins. A Bretonneau, la synchronisation des tournées de manutentionnaires et des tournées de collectes ne permet pas de considérer uniquement des tournées de type livraison (une tournée collectant des chariots à Bretonneau doit attendre que ces chariots soient collectés par les manutentionnaires). Cependant, nous considérons l'hypothèse que les collectes des chariots de

	Modèle exploratoire	**Modèle appliqué**
Contraintes de production ou de préparation des chariots aux dépôts	Aucune	Pour chaque flux, une date de préparation au plus tôt du premier chariot et un temps de production par chariot
Contraintes des capacités des véhicules	Borné par un volume et un nombre maximal de chariots	Borné par un nombre maximal de chariots
Contraintes des capacités des routes des manutentionnaires (fenwicks + pieds)	Borné par un poids et un nombre maximal de chariots	Borné par un nombre maximal de chariots
Contraintes de temps de déchargements/chargements des chariots à un quai	Identique quelque soit la place d'un quai	Dépend de la place du quai (haut ou bas)
Contraintes de collecte des chariots à Bretonneau	Attente des véhicules si les chariots à collecter ne sont pas encore collectés par les manutentionnaires	Hypothèse : les collectes sont réalisées la veille, les tournées de collectes sont modélisées par des livraisons fictives
Contraintes de temps de livraison/collecte	Temps de livraison par point et par flux ($tl_{i,p}$)	Temps de livraison plus détaillé : temps moyen d'accès au service, temps de déposer et dépaqueter le chariot et prise en compte de la capacité des ascenseurs.
Contraintes sur les flux à assurer à l'intérieur de Bretonneau par les manutentionnaires	Tous les flux sont à gérer par les manutentionnaires	Certains flux peuvent ne pas être pris en compte dans les tournées des manutentionnaires, mais seulement dans les tournées des chauffeurs

TAB. 4.1 – Différences entre le modèle exploratoire et le modèle appliqué

Bretonneau peuvent être réalisées la vieille au soir pour une collecte par les véhicules le lendemain matin au quai. Pour modéliser cet aspect, il suffit de représenter les demandes à collecter à Bretonneau par des demandes de chariots à livrer avec des fenêtres de temps en fin d'après midi. En considérant uniquement des tournées de livraisons, la complexité de l'étape d'évaluation d'un individu, en particulier pour les tournées des manutentionnaires, diminue.

Comme le CHRU n'est pas certain de prendre en compte tous les flux dans le projet de la réorganisation de la logistique, il faut prévoir le cas où certains flux ne seront pas gérés, en particulier la salubrité. Pour ce cas, il suffirait de retirer dans les données toutes les demandes affectées à ce flux. Cependant, il existe actuellement une équipe appartenant à la salubrité qui se charge de collecter les chariots de linge sales et de déchets à Bretonneau. Cette équipe pourrait donc intervenir en parallèle de l'équipe de manutention, et collecterait à leur place le linge sale. Suite à ce souhait du CHRU, nous avons ajouté un attribut Br_p par type de produit p égale à 1 si le flux est à prendre en compte à l'intérieure de Bretonneau, 0 sinon. Les demandes appartenant à un flux p tel que $Br_p = 0$, seront considérées comme livrées au quai de Bretonneau, et le calcul des retards s'effectuera par rapport à leurs dates d'arrivée au quai et de leurs dates de fin livraison définies par $l_{i,p,t}$.

Après une étude approfondie du terrain de Bretonneau, il n'est finalement pas envisageable que les manutentionnaires puissent livrer certains bâtiments par fenwick extérieur. Comme présenté dans le chapitre 1 section 1.2.9, un sous-ensemble de bâtiments de Bretonneau peut être livré par des manutentionnaires (les cinq plus importants) parmi lesquels certains sont livrables uniquement par fenwick (étant donné la distance des couloirs sous-terrains et la possibilité d'augmenter le nombre de fenwicks), et un autre sous-ensemble peut être livré par véhicule (cf. figure 4.1). Nous avons donc changé les points de livraisons pour prendre en compte cet aspect et retiré la possibilité de livrer par fenwick extérieur.

D'autre part, la gestion des manutentionnaires et le calcul des tournées intra-Bretonneau ont été revus. Il paraît difficilement concevable de donner à chaque manutentionnaire la liste précise des chariots à livrer de chacune de ses tournées avec les dates à laquelle il doit partir du Quai. Nous avons donc décidé de déterminer les tournées intra en fonction du comportement qu'aurait un manutentionnaire vis-à-vis des chariots arrivant sur le quai. Ce comportement doit tenir compte des facteurs suivants : la priorité des chariots, des dates au plus tôt de livraison (un manutentionnaire ne prendra pas les chariots s'il sait qu'il va attendre dans le service), la destination des chariots (regroupement par bâtiment) et de la disponibilité des fenwicks. Nous détaillerons l'algorithme du comportement d'un manutentionnaire dans la section 4.2 suivante.

Un dernier point rectifié concerne le temps de livraison de chaque point $tl_{i,p}$ par les manutentionnaires ou les chauffeurs. Ce temps dépend du type de chariot pour différencier le temps de dépaquetages des chariots, et aussi des temps moyens d'accès aux services à livrer. Cependant, un élément non négligeable pour le calcul du temps de livraison d'un point est l'ascenseur. Seuls deux chariots peuvent être logés dans tous les ascenseurs des

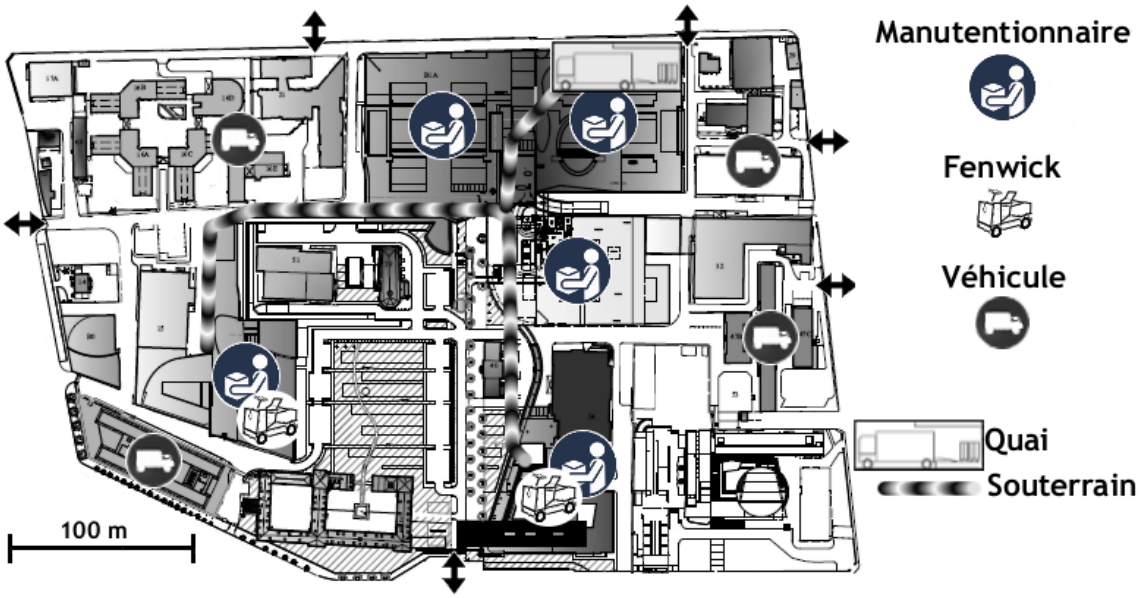


FIG. 4.1 – Plan de Bretonneau

hôpitaux. Lorsqu'un livreur arrive au pied du bâtiment, il ne peut monter les chariots que deux par deux. Pour modéliser cette nouvelle contrainte, nous remplaçons la donnée $tl_{i,p}$ par deux nouvelles :

- ta_i : le temps moyens d'accès aux services au point i.
- td_p : le temps de déposer ou dépaqueter si besoin, les chariots de produit p.

Lorsqu'un chauffeur arrive au pied d'un bâtiment d'un point i pour livrer en produits p le jour t une quantité $q_{i,p,t}$ de chariots, le temps total de livraison avec chargement et déchargement des chariots est égal à $q_{i,p,t} \times (2 \times tch_p + td_p) + 2 \times ta_i \times \lceil q_{i,p,t}/2 \rceil$. Le temps total de livraison pour un manutentionnaire est défini par la même expression sans le terme tch_p de chargement/déchargement des chariots du véhicule.

Enfin, les contraintes prises en compte dans ce modèle, contrairement au modèle précédent, sont les suivantes :

- un temps de production ou de préparation des chariots par type p modélisé par une heure de début au plus tôt h_p et une durée dp_p par chariot de production ou préparation.
- et un type de place pour chaque quai de chaque point de livraison. Ce type est soit "haut" soit "bas", et influence le temps de chargement et déchargement des chariots à un quai qui ne dépend plus d'uniquement du type de produit (le type haut permettant de charger et décharger plus rapidement). Lorsqu'un véhicule arrive à un quai, il mobilisera en priorité une place de type haut.

4.2 Impacts sur les algorithmes existants

L'une des plus grosses modifications des deux méta-heuristiques développées pour le précédent modèle concerne l'évaluation d'une solution pour prendre en compte les temps de production, les types de places et le fait que certains flux véhiculés par les camions ne sont pas pris en charge par les manutentionnaires.

Pour la simulation du comportement des manutentionnaires, nous avons mis en place un nouvel algorithme. Ce dernier est plus simple à expliquer que celui du modèle précédent puisqu'il n'intègre pas de tournées de type collecte. L'algorithme consiste à exécuter une procédure décrite par la figure 4.2 (les constantes ϵ, α et λ sont des paramètres, $\epsilon \approx 15$ min., $\alpha \approx 3$ heures, $\lambda \approx 5$ min). Cette procédure est exécutée à un instant t lorsque le nombre de tournées intra se déroulant au même moment est inférieur à NbT_{intra} et des chariots attendant sur le quai de Bretonneau peuvent être livrés. La sélection des chariots doit se faire toujours en respectant la **condition 1** définie par :

- $l_{i,p,t}$ est la plus petite valeur parmi tous les chariots sur le quai à l'instant t
- $e_{i,p,t} < t + \epsilon$ et $l_{i,p,t} < t + \alpha$

L'algorithme génétique possède la même structure que celle décrite à la section 3.3 du chapitre précédent. Cependant la génération de la population initiale proposée en section 3.3.2 a été améliorée de manière à mieux répartir les chariots dans les véhicules. Les N individus de cette population sont générés de la manière suivante :

- Découper la période considérée τ en plusieurs demi-journées.
- Pour les demandes attribuées à un jour particulier, affecter chaque demande dont l'intersection entre la fenêtre de temps correspondante et la demi-journée est la plus grande parmi les deux demi-journées concernées.
- Affecter aléatoirement les autres demandes (non attribuées à un jour) aux demi-journées.
- Enfin, pour chaque demi-journée :
  - Trier aléatoirement les demandes affectées à cette demi-journée.
  - Affecter un numéro de véhicule pour chaque demande de manière suivante :
    - Trier aléatoirement dans une liste les véhicules.
    - Prendre le premier véhicule de cette liste, et lui affecter les x premières demandes jusqu'à atteindre sa capacité maximum.
    - Positionner ce véhicule à la fin de la liste et réitérer à l'étape précédente s'il reste des demandes à affecter dans la demi-journée considérée.

Nous avons également modifié l'opérateur de croisement type PMX de telle sorte que les deux sous-segments échangés entre les deux individus soient positionnés au même niveau dans le codage des deux solutions. La recherche tabou possède, elle aussi, la même structure que celle décrite à la section 3.4 du chapitre précédent.

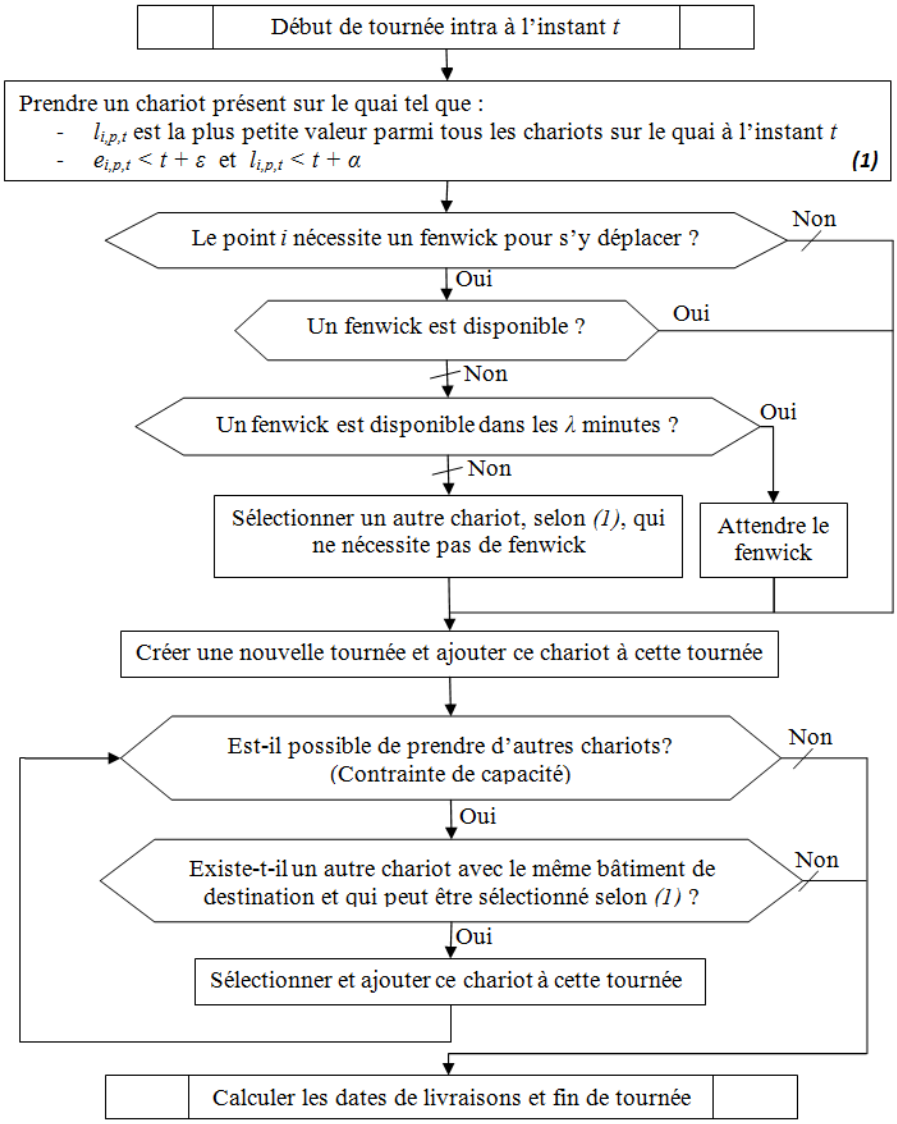


FIG. 4.2 – Comportement des manutentionnaires

4.3 Algorithme mémétique

Le terme algorithme mémétique (Moscato [149]) est souvent utilisé pour désigner les méthodes de résolution qui hybrident une recherche à base de population, comme un algorithme évolutionnaire et une recherche par voisinage, comme une recherche locale. L'algorithme mémétique, décrit ici, est le résultat d'une hybridation des deux méthodes précédentes : l'algorithme génétique et la recherche tabou. La structure générale de cette hybridation est présentée par l'algorithme 3. Nous avons ajouté à l'algorithme génétique présenté à la section 3.3, une étape d'amélioration de la population qui fait appel à la recherche tabou. Cette recherche tabou est exécutée sur chaque individu de la population courante avec une probabilité P_{TS}. Le nombre d'itérations de la recherche tabou dépend de l'itération courante I de l'algorithme génétique, il est fixé à $I/4$. Le critère d'arrêt de l'algorithme mémétique est un nombre d'itérations sans amélioration $\#ite$ de la meilleure solution trouvée.

L'algorithme mémétique utilise le même codage d'une solution que les deux précédents algorithmes développés. La construction de la population initiale, les opérateurs de sélection, de croisement et mutation sont les mêmes que l'algorithme génétique. Après l'étape de mutation, l'algorithme tabou est exécuté sur chaque individu de la population avec une probabilité P_{TS}. Seul un ensemble d'individus de la population est donc amélioré par la tabou avec un nombre d'itérations égal à $\lfloor I/4 \rfloor$. Le calcul du voisinage d'une solution et la gestion de la liste tabou pour l'étape d'amélioration des individus sont identiques à ceux de la recherche tabou. L'application systématique de la recherche tabou à tout individu demanderait trop de temps, ce qui justifie l'utilisation d'une probabilité P_{TS}. Le choix de limiter le nombre d'itérations de la recherche tabou à $I/4$ permet de répartir les rôles entre elle et l'algorithme génétique. Initialement c'est l'algorithme génétique qui prévaut, puis au fil des itérations $I/4$ augmente et la recherche tabou influence de plus en plus la recherche.

4.4 Résultats expérimentaux

Avant de présenter les résultats expérimentaux sur ces trois algorithmes, nous allons décrire la méthode de génération des nouvelles instances. Comme pour le chapitre précédent, les instances ont été générées en fonction de données réelles fournies par l'hôpital. Le langage utilisé pour l'implémentation des algorithmes est le $C++$. L'ordinateur utilisé est un Intel(R) 2 Core (TM) 2 Duo CPU 3.00 GHz, 3.48 Go de RAM.

4.4.1 Génération d'instances

Des nouvelles instances ont été générées de manière à prendre en compte les nouvelles contraintes et hypothèses de ce modèle appliqué. La méthode de génération est identique à celle du précédent modèle : une instance théorique la plus proche possible du réel est créée, puis plusieurs instances sont générées à partir de celle-ci. L'instance théorique a donc été conçue à partir de données réelles du CHRU. Même si des nouvelles données étaient plus complètes que pour la précédente version, certaines quantités de chariots demandées avec

Algorithme 3 Structure générale de l'algorithme mémétique

1: $\mathcal{P}_{courant} \leftarrow$ Initialiser une population de N individus
2: Evaluer chaque individu de $\mathcal{P}_{courant}$
3: $S_{best} \leftarrow$ Le meilleur individu $S \in \mathcal{P}_{courant}$
4: $I \leftarrow 0$
5: **Tant que** $I < \#ite$ **faire**
6: $\quad \mathcal{P}_{enfant} \leftarrow \emptyset$
7: $\quad$ **Pour** $j = 0$ à $j = N/2$ **faire**
8: $\quad\quad (P_1, P_2) \leftarrow$ Sélectionner deux individus parents de $\mathcal{P}_{courant}$
9: $\quad\quad (E_1, E_2) \leftarrow$ Croiser les deux parents (P_1, P_2) pour obtenir deux individus enfants
10: $\quad\quad \mathcal{P}_{enfant} \leftarrow \mathcal{P}_{enfant} \cup E_1 \cup E_2$
11: $\quad$ **Fin pour**
12: $\quad$ Muter aléatoirement des individus de la population $\mathcal{P}_{enfant}$
13: $\quad$ **Pour** Chaque indivdu *ind* de $\mathcal{P}_{enfant}$ **faire**
14: $\quad\quad$ **Si** une amélioration est décidée (décision prise avec la probabilité P_{TS}) **alors**
15: $\quad\quad\quad S_{courant} \leftarrow$ Solution de *ind*
16: $\quad\quad\quad$ Liste tabou $\leftarrow \emptyset$
17: $\quad\quad\quad$ **Pour** $j = 0$ à $j = \lfloor I/4 \rfloor$ **faire**
18: $\quad\quad\quad\quad \Psi \leftarrow$ Calculer le voisinage non tabou de la solution de $S_{courant}$
19: $\quad\quad\quad\quad S_{courant} \leftarrow$ Meilleure solution du voisinage Ψ
20: $\quad\quad\quad\quad$ Stocker le mouvement dans la liste tabou
21: $\quad\quad\quad$ **Fin pour**
22: $\quad\quad$ **Fin si**
23: $\quad$ **Fin pour**
24: $\quad \mathcal{P}_{courant} \leftarrow \mathcal{P}_{enfant}$
25: $\quad$ Evaluer chaque individu de $\mathcal{P}_{courant}$
26: $\quad$ **Si** il existe un individu $S \in \mathcal{P}_{courant}$ meilleur que S_{best} **alors**
27: $\quad\quad S_{best} \leftarrow S$
28: $\quad\quad I \leftarrow 0$
29: $\quad$ **Fin si**
30: $\quad I \leftarrow I + 1$
31: **Fin Tant que**

leurs fenêtres de temps ont du être estimées à partir des tournées existantes ou de distributions empiriques données par le CHRU. Les caractéristiques de cette instance théorique sont les suivantes :

- L'ensemble $\mathcal{D}$ est constitué de 4 dépôts (Logipôle, Blanchisserie, Salubrité à Bretonneau et les Archives près de Trousseau).
- L'ensemble $\mathcal{H}$ est composé de 9 hôpitaux (Trousseau 1, Trousseau 2, Bretonneau, Clocheville 1, Clocheville 2, Ermitage, CPTS et CPU) et de 7 bâtiments de Bretonneau livrables par véhicules. Les quais de Trousseau possèdent 6 places de type haut, Bretonneau en dispose de 2 de type haut et 2 de type bas, les quais de Clocheville et d'Ermitage sont composés 2 places de type bas, CPU et CPTS en disposent seulement d'un de type bas. Tous les bâtiments de Bretonneau sont composés d'une seule place de type bas sauf un bâtiment qui en possède un de type haut.
- L'ensemble $\mathcal{B}$ est constitué de 4 bâtiments à Bretonneau livrables uniquement par manutentionnaire.
- La période de planification τ est toujours de 5 jours, les demandes affectées au sixième jour sont celles qui ne sont pas assignées à un jour fixe dans la semaine.
- L'ensemble $\mathcal{P}$ est composé de 11 types de chariots ou flux (LH, Pharmacie, repas du midi, repas du soir, linge propre 1, linge propre 2, linge sale 1, linge sale 2, la stérilisation, les dossiers patients et les déchets). Les caractéristiques de ces flux sont notés dans le tableau 4.2. Nous supposerons que l'ensemble des flux sont pris en charge par les manutentionnaires de Bretonneau ($\forall p \in \mathcal{P},\ Br_p = 1$).

Nom	Dépôt	td_p (min)	g_p (min)	h_p	dp_p (min)
LH	Logipôle	10	-	07 : 00	1
Pharmacie	Logipôle	1	-	07 : 00	3
Repas midi	Logipôle	1	200	06 : 30	2
Repas soir	Logipôle	1	200	13 : 00	2
Linge Propre 1	Blanchisserie	1	-	07 : 00	2
Linge Propre 2	Blanchisserie	1	-	07 : 00	2
Linge Sale 1	Blanchisserie	1	-	06 : 00	0
Linge Sale 2	Blanchisserie	1	-	06 : 00	0
Stérilisation	Logipôle	1	-	07 : 00	1
Dossiers patients	Archives	20	-	07 : 00	10
Déchets	Salubrité	1	-	07 : 00	1

TAB. 4.2 – Flux logistiques de l'instance théorique

- L'ensemble des véhicules $\mathcal{V}$ est constitué de 16 camions dont la capacité est 12 chariots pour un véhicule, 16 pour 4, 20 pour 2 et 21 pour 9.
- Il y a au total 4 fenwicks intérieurs qui peuvent tracter 5 chariots. Les fenwicks permettent de se déplacer deux fois plus vite qu'à pied.
- L'ensemble $\mathcal{R}$ est composé de 22 personnes à répartir entre l'équipe des chauffeurs et celle des manutentionnaires. Un manutentionnaire peut tracter en moyenne 2 chariots.

Les temps de chargement et déchargement, le temps de livraison par point, l'ensemble des produits transportables suivant le moyen de transport, ainsi que les durées de déplacements entre hôpitaux et au sein de Bretonneau sont celles fournies par le CHRU. Comme pour la première partie du chapitre, pour les quelques flux dont le CHRU nous a fourni les distributions empiriques, nous avons retenu pour chaque service une valeur haute du nombre de chariots (correspondant à une probabilité cumulée de l'ordre de 90%). Pour les autres flux, nous nous sommes basés sur les tournées existantes pour estimer le nombre de chariots constituant chaque demande. Il en est de même pour les fenêtres de temps. Cette instance compte au total 680 demandes pour 2775 chariots. La répartition totale des chariots sur les différents points de livraisons est représentée par la figure 4.3 (2775 chariots pour les tournées inter et 793 chariots pour les tournées intra).

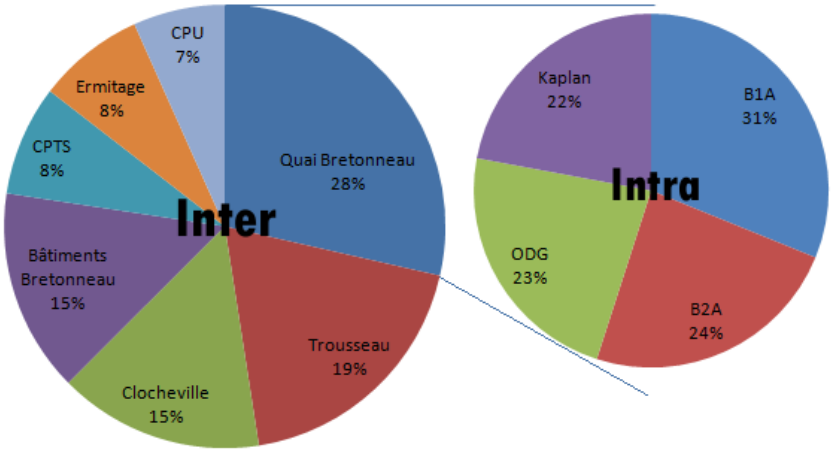


FIG. 4.3 – Répartition des chariots par point de livraison

Le tableau 4.3 présente par jour une borne inférieure du temps total des livraisons à effectuer pour les tournées intra-Bretonneau et inter-hôpitaux (le jour 5 désigne les demandes affectées à aucune journée). Ces bornes inférieures sont obtenues en effectuant la somme des éléments suivants :

- les temps de dépaquetages des chariots de toutes les demandes,
- les temps de chargements et déchargements de tous les chariots sur les quais les plus rapides pour cette opération, dépendant donc de leurs points de livraison,
- les temps moyens d'accès aux services de toutes les demandes suivant leurs points de livraison et modulo 2 chariots (contrainte des ascenseurs),
- et les temps d'aller/retour minimum entre les dépôts et les points de livraison en prenant les moyens de transports ayant les plus grandes capacités.

A partir de cette instance théorique, cent instances ont été générées pour réaliser les tests. Les quantités de chariots des demandes de l'instance théorique étant surestimées, ces instances ont été construites en diminuant aléatoirement certaines quantités de chariots demandées de 1 à 2 suivant que le nombre théorique est inférieur ou supérieur à 4. Les fenêtres de temps sont également modifiées aléatoirement, la date de livraison au plus tôt et

Jour t	Tournées inter (min)	Tournées intra (min)
0	4608	1157
1	4398	1195
2	4329	1068
3	4317	1175
4	4458	1059
5	1051	314

TAB. 4.3 – Bornes inférieures du temps total des livraisons

la date de livraison au plus tard sont décalées de plus ou moins une heure indépendamment.

4.4.2 Algorithme génétique

Après des tests préliminaires, la taille de la population a été fixée à $N = 200$, la probabilité de mutation P_{mut} à 60% et dans le cas d'une mutation l'opérateur agissant sur le numéro de véhicule est choisi avec une probabilité de 40% contre 60% pour l'opérateur agissant sur le déplacement d'un gène. Les paramètres importants correspondant au nombre maximal des tournées inter-hôpitaux et intra-Bretonneau se déroulant au même moment ont été fixés à $NbT_{inter} = 8$ et $NbT_{intra} = 3$. Comme pour le chapitre précédent, nous nous avons ensuite étudié l'influence de l'opérateur de sélection (sélection des 50% meilleurs (M), sélection par roulette (R) et sélection par tournoi (T)) et l'influence de l'opérateur de croisement (par recopie (C) ou par insertion (I)). Un couple (sélection, croisement) est encore appelé une configuration. Les tableaux 4.4 et 4.5 résument les résultats sur 100 instances de chacune des six configurations pour $\#ite = 200$ et $\#ite = 400$. Δ_i est la moyenne sur toutes les instances des écarts relatifs de la solution trouvée par la configuration i à la meilleure solution trouvée par l'ensemble des 6 configurations. L'écart type est indiqué par $\sigma(\Delta_i)$. Nb_{min} est le nombre de fois où la configuration i trouve la meilleure solution et Tps indique le temps moyen de résolution en secondes.

Crois.	C	C	C	I	I	I
Sélec.	M	R	T	M	R	T
Δ_i (%)	4,5	70,8	16,4	90,8	92,2	90,1
$\sigma(\Delta_i)$	9,4	7,1	15,7	1,9	1,5	2,0
Nb_{min}	72	0	28	0	0	0
Tps (s)	3177,35	2016,48	5343,24	681,63	315,88	301,41

TAB. 4.4 – Résultat pour l'AG avec $\#ite = 200$

L'opérateur de croisement I semble être beaucoup moins performant que l'opérateur C quelque soit l'opérateur de sélection et le nombre d'itérations sans amélioration. Tandis que les opérateurs de sélection M et T semblent largement dominer l'opérateur R. Enfin, parmi les deux configurations dominantes (C, M) et (C, T), (C,M) permet d'obtenir de

Crois.	C	C	C	I	I	I
Sélec.	M	R	T	M	R	T
Δ_i (%)	7,3	68,5	13,4	91,0	92,7	90,5
$\sigma(\Delta_i)$	11,0	6,4	16,0	1,6	1,4	1,8
Nb_{min}	56	0	44	0	0	0
Tps (s)	4881,26	3326,59	5140,86	1249,85	598,16	537,91

TAB. 4.5 – Résultat pour l'AG avec $\#ite = 400$

meilleures solutions quelque soit le nombre d'itérations sur la moyenne des écarts relatifs. Par rapport aux résultats expérimentaux du chapitre précédent, l'opérateur de croisement I est devenu inutile.

Les tableaux 4.6 et 4.7 présentent une moyenne sur les 100 instances de la fonction objectif, de la somme des retards en minutes, de la somme des dépassements des autonomies des chariots repas, des bornes inférieure et supérieure du nombre de manutentionnaires, des bornes inférieure et supérieure du nombre de chauffeurs, du nombre de demandes en retard et du nombre de demandes en chariot repas pour lesquelles l'autonomie d'au moins un chariot a été dépassée.

Crois.	C	C	C	I	I	I
Sélec.	M	R	T	M	R	T
Fonction objectif	2226,12	7371,24	2591,63	23046,34	26933,70	21250,97
Somme des retards	1997,84	7093,34	2356,03	22613,62	26427,77	20847,08
Somme des dépassements des autonomies	11,88	49,90	16,20	195,22	267,48	166,89
Borne inférieure (manutentionnaires)	5,98	5,99	5,98	6,04	6,02	6,01
Borne supérieure (manutentionnaires)	6,00	6,00	6,00	6,08	6,02	6,03
Borne inférieure (chauffeurs)	14,35	15,43	14,79	16,00	15,76	15,90
Borne supérieure (chauffeurs)	16,95	18,18	17,11	19,38	19,89	19,46
Nombre de demandes en retard	39,11	97,39	45,31	161,11	197,70	155,43
Nombre de demandes avec autonomie dépassée	1,19	3,20	1,31	7,41	9,71	7,13

TAB. 4.6 – Résultats des six configurations de l'AG avec $\#ite = 200$

Les tableaux 4.6 et 4.7 confirment la dominance des configurations (C,M) et (C,T) sur les autres configurations. Nous pouvons également noter que lors de l'évaluation d'une

Crois.	C	C	C	I	I	I
Sélec.	M	R	T	M	R	T
Fonction objectif	2168,09	6364,21	2342,84	22065,21	27018,94	20784,64
Somme des retards	1939,24	6085,55	2112,88	21666,30	26530,49	20379,70
Somme des dépassements des autonomies	12,75	51,41	13,11	161,81	249,70	168,39
Borne inférieure (manutentionnaires)	5,89	6,00	5,96	6,02	6,02	6,04
Borne supérieure (manutentionnaires)	6,00	6,00	6,00	6,06	6,05	6,12
Borne inférieure (chauffeurs)	14,41	15,43	14,43	16,05	15,81	15,95
Borne supérieure (chauffeurs)	16,92	18,02	16,98	19,29	19,87	19,20
Nombre de demandes en retard	37,55	89,03	41,43	156,21	196,97	152,77
Nombre de demandes avec autonomie dépassée	1,20	3,42	1,33	6,67	9,22	6,96

TAB. 4.7 – Résultats des six configurations de l'AG avec $\#ite = 400$

solution, la borne supérieure et la borne inférieure du nombre de manutentionnaires sont égales dans la plupart des cas. Cependant, la différence entre la borne supérieure et la borne inférieure du nombre de chauffeurs est souvent égale à deux dans la plupart des cas. L'influence du nombre d'itérations sans amélioration n'est pas importante pour la configuration (C, M), contrairement à la configuration (C, T) où une plus grande amélioration des solutions est visible. Cette configuration permettrait d'obtenir les mêmes résultats que (C, M) mais convergerait plus lentement. Une nette amélioration est aussi notable pour la configuration (C, R).

4.4.3 Algorithme tabou

Nous avons testé l'algorithme tabou sur ces 100 instances de la même manière que l'algorithme génétique. Les différentes combinaisons testées dépendent de trois paramètres : le nombre d'itérations sans amélioration $\#ite$(5000 et 10000), l'opérateur de voisinage de type déplacement d'une demande Op_{mov} (60 et 80) et la taille de la liste tabou T_{lt} (1, 25, 50, 75 et 100). Les tableaux 4.8 et 4.9 présentent les mêmes indicateurs que pour les tests de l'algorithme génétique : la moyenne Δ_i des écarts relatifs entre la meilleure solution trouvée pour toutes les combinaisons et la meilleure solution trouvée par la configuration i, l'écart type $\sigma(\Delta_i)$, le nombre d'instances pour lesquelles la combinaison i trouve la meilleure solution (Nb_{min}) et le temps moyen de résolution en secondes (Tps). Pour une comparaison plus fine, nous avons ajouté le nombre d'instances pour lesquelles l'écart relatif est inférieur à 10% ($Nb_{\Delta \leq 10}$) et 20% ($Nb_{\Delta \leq 20}$).

Op_{mov}	60	60	60	60	60	80	80	80	80	80
T_{lt}	1	25	50	75	100	1	25	50	75	100
$\Delta_i(\%)$	19,7	16,0	21,1	29,0	33,3	19,9	13,3	20,0	24,6	29,4
$\sigma(\Delta_i)(\%)$	16,8	12,3	13,0	12,0	13,0	15,0	12,0	14,0	14,2	12,6
Nb_{min}	19	15	10	0	0	15	19	14	6	2
$Tps(s)$	530,8	960,9	759,1	725,4	725,8	618,2	887,7	908,0	895,2	853,4
$Nb_{\Delta\leq 10}$	37	37	23	6	5	31	46	27	18	8
$Nb_{\Delta\leq 20}$	57	60	47	21	19	50	74	50	36	22

TAB. 4.8 – Résultats pour la recherche tabou avec $\#ite = 5000$

Op_{mov}	60	60	60	60	60	80	80	80	80	80
T_{lt}	1	25	50	75	100	1	25	50	75	100
$\Delta_i(\%)$	19,2	13,8	22,8	28,7	33,2	19,9	12,8	19,9	26,1	33,2
$\sigma(\Delta_i)(\%)$	14,3	11,2	13,2	13,6	13,0	14,6	12,4	14,0	13,8	13,6
Nb_{min}	15	23	4	3	0	12	27	14	3	0
$Tps(s)$	1076	1441	1429	1484	1381	1022	1666	1824	1809	1707
$Nb_{\Delta\leq 10}$	28	39	21	10	3	27	49	26	11	6
$Nb_{\Delta\leq 20}$	52	73	39	27	16	51	68	51	33	16

TAB. 4.9 – Résultats pour la recherche tabou avec $\#ite = 10000$

Les résultats montrent globalement peu de différences pour la valeur de l'opérateur de voisinage. Néanmoins, une faible taille de la liste tabou est préférable à une grande taille. Nous pouvons remarquer que deux combinaisons semblent dominer les autres : ($Op_{mov} = 60$, $T_{lt} = 25$) et ($Op_{mov} = 80$, $T_{lt} = 25$) avec un temps de résolution moins important pour la première combinaison. Ensuite, comme pour l'algorithme génétique, nous avons relevé sur les 6 meilleures combinaisons (en enlevant les combinaisons avec des tailles de liste tabou égales à 74 et 100) la moyenne sur 100 instances de la fonction objectif, de la somme des retards en minutes, de la somme des dépassements des autonomies des chariots repas, des bornes inférieure et supérieure du nombre de manutentionnaires, des bornes inférieure et supérieure du nombre de chauffeurs, du nombre de demandes en retard et du nombre de demandes en chariots repas pour lesquelles l'autonomie d'au moins un chariot a été dépassée. Les tableaux 4.10 et 4.11 présentent ces résultats.

Les résultats des tableaux 4.10 et 4.11 confirment la dominance des deux combinaisons ($Op_{mov} = 60$, $T_{lt} = 25$) et ($Op_{mov} = 80$, $T_{lt} = 25$). D'autre part, en doublant le nombre d'itérations sans amélioration, le temps de résolution est aussi doublé mais la valeur moyenne de la fonction objectif des solutions ne diminue qu'au plus de 7,5% quelque soit la combinaison. De plus, le nombre d'itérations sans amélioration influence très peu les bornes inférieures et supérieures du nombre des manutentionnaires et des chauffeurs.

Op_{mov}	60	60	60	80	80	80
T_{lt}	1	25	50	1	25	50
Fonction objectif	2785,8	2565,7	2728,4	2770,1	2490,1	2694,6
Somme des retards	2480,8	2272,7	2441,6	2465,9	2201,0	2410,9
Somme des dépassements des autonomies	79,06	68,56	62,30	77,80	64,57	58,59
Borne inférieure (manutentionnaires)	5,99	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Borne supérieure (manutentionnaires)	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Borne inférieure (chauffeurs)	15,53	15,46	15,41	15,59	15,44	15,52
Borne supérieure (chauffeurs)	17,68	17,43	17,48	17,68	17,47	17,51
Nombre de demandes en retard	94,79	90,18	89,52	95,87	88,53	89,39
Nombre de demandes avec autonomie dépassée	4,49	4	3,75	4,49	3,71	3,75

TAB. 4.10 – Résultats des six meilleures combinaisons avec $\#ite = 5000$

Op_{mov}	60	60	60	80	80	80
T_{lt}	1	25	50	1	25	50
Fonction objectif	2534,9	2295,56	2553,3	2550,3	2273,1	2475,6
Somme des retards	2233,3	2014,2	2274,2	2250,1	1990,6	2196,6
Somme des dépassements des autonomies	75,35	56,14	54,24	74,96	58,99	54,77
Borne inférieure (manutentionnaires)	6,00	6,00	5,99	6,00	6,00	6,00
Borne supérieure (manutentionnaires)	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Borne inférieure (chauffeurs)	15,73	15,51	15,52	15,51	15,33	15,48
Borne supérieure (chauffeurs)	17,52	17,53	17,46	17,54	17,37	17,36
Nombre de demandes en retard	90,83	85,48	86,07	92,03	84,21	85,97
Nombre de demandes avec autonomie dépassée	4,15	3,42	3,35	4,17	3,40	3,51

TAB. 4.11 – Résultats des six meilleures combinaisons avec $\#ite = 10000$

Sélection	M	R	T	M	R	T	M	R	T
T_{lt}	1	1	1	10	10	10	25	25	25
$\Delta_i(\%)$	27,0	48,4	34,6	25,1	40,5	31,1	20,3	41,2	30,9
$\sigma(\Delta_i)(\%)$	20,5	17,4	21,0	21,1	20,0	19,7	21,0	17,6	19,8
Nb_{min}	12	1	9	24	4	8	33	0	9
$Tps(s)$	3732	4244	3795	4067	5025	4489	3826	4333	3838
$Nb_{\Delta\leq 10}$	29	1	15	35	7	17	42	5	18
$Nb_{\Delta\leq 20}$	41	3	27	45	18	30	57	13	32

TAB. 4.12 – Résultats pour l'algorithme mémétique avec une population de 100 individus

Sélection	M	R	T	M	R	T	M	R	T
T_{lt}	1	1	1	10	10	10	25	25	25
$\Delta_i(\%)$	27,3	48,2	33,5	25,4	45,0	33,8	22,3	43,7	29,5
$\sigma(\Delta_i)(\%)$	20,0	19,6	19,2	20,8	16,4	21,1	20,1	19,0	20,7
Nb_{min}	18	4	7	20	1	8	25	3	15
$Tps(s)$	9418	10835	9151	10979	11535	9188	12540	14039	11920
$Nb_{\Delta\leq 10}$	27	5	11	29	3	15	38	5	23
$Nb_{\Delta\leq 20}$	37	9	24	45	8	28	52	12	36

TAB. 4.13 – Résultats pour l'algorithme mémétique avec une population de 200 individus

4.4.4 Algorithme mémétique

Suite à des tests préliminaires et aux résultats de l'algorithme génétique et de l'algorithme tabou, nous avons fixé le nombre d'itérations sans amélioration de l'algorithme mémétique à 100. La taille de la population est composée de 100 individus puis 200 individus. L'opérateur de croisement est C et les trois opérateurs de sélection ont été testés. Les probabilités de mutation sont identiques à celles de l'algorithme génétique. L'opérateur de voisinage de type déplacement d'une demande pour l'algorithme tabou a été fixé à 60 et les trois valeurs de la taille de liste tabou testées sont 1, 10 et 25. Les tableaux 4.12 et 4.13 présentent les mêmes indicateurs que pour les tests des algorithmes précédents : la moyenne Δ_i des écarts relatifs entre la meilleure solution trouvée pour toutes les combinaisons et la meilleure solution trouvée par la configuration i, l'écart type $\sigma(\Delta_i)$, le nombre d'instances pour lesquelles la combinaison i trouve la meilleure solution (Nb_{min}) et le temps moyen de résolution en secondes (Tps). Pour une comparaison plus fine, nous avons également ajouté le nombre d'instances pour lesquelles l'écart relatif est inférieur à 10% ($Nb_{\Delta\leq 10}$) et 20% ($Nb_{\Delta\leq 20}$).

Les résultats montrent globalement une dominance de l'opérateur de sélection M quelque soit la taille de la liste tabou. De plus, indépendamment de l'opérateur de sélection, une taille de la liste tabou égale à 25 paraît le meilleur compromis. La combinaison (M, 25) est donc la plus performante. Mais l'écart entre cette combinaison et toutes les autres combinaisons diminue légèrement lorsque le nombre d'individus dans la population augmente.

Ensuite, comme pour les autres algorithmes, nous avons relevé sur les 6 meilleures combinaisons (en enlevant les combinaisons avec l'opérateur de sélection R) la moyenne sur 100 instances de la fonction objectif, de la somme des retards en minutes, de la somme des dépassements des autonomies des chariots repas, des bornes inférieure et supérieure du nombre de manutentionnaires, des bornes inférieure et supérieure du nombre de chauffeurs, du nombre de demandes en retard et du nombre de demandes en chariot repas pour lesquelles l'autonomie d'au moins un chariot a été dépassée. Les tableaux 4.14 et 4.15 présentent ces résultats.

Sélection	M	T	M	T	M	T
T_{lt}	1	1	10	10	25	25
Fonction objectif	2995,5	3316,0	2892,9	3151,6	2739,0	3086,7
Somme des retards	2750,6	3073,4	2649,5	2906,7	2499,6	2844,9
Somme des dépassements des autonomies	22,22	19,58	21,43	21,84	16,93	18,18
Borne inférieure (manutentionnaires)	6,00	5,98	6,00	6,00	5,99	6,00
Borne supérieure (manutentionnaires)	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Borne inférieure (chauffeurs)	15,13	15,11	15,09	15,15	15,15	15,25
Borne supérieure (chauffeurs)	17,41	17,52	17,32	17,47	17,37	17,47
Nombre de demandes en retard	63,29	67,75	63,00	65,42	60,49	65,41
Nombre de demandes avec autonomie dépassée	1,81	1,75	1,84	1,74	1,61	1,62

TAB. 4.14 – Résultats des six meilleures combinaisons avec une population de 100 individus

Les tableaux 4.14 et 4.15 montrent aussi la dominance de la combinaison (M, 25) néanmoins l'écart avec toutes les autres combinaisons se réduit lorsque le nombre d'individus dans la population augmente. Dans le cas d'une population de 200 individus, le nombre moyen de demandes en retard et les bornes inférieures et supérieures du nombre de personnes sont sensiblement les mêmes sur toutes les combinaisons. Les différentes combinaisons se distinguent donc entre elles sur principalement le critère de la somme des retards. Enfin, l'augmentation de la population permet d'améliorer nettement la qualité des solutions trouvées par les différentes combinaisons, au détriment du temps de résolution qui est parfois triplé.

4.4.5 Comparaison des trois algorithmes

Nous avons ensuite comparé les meilleures combinaisons identifiées précédemment, relativement aux trois algorithmes. Pour l'algorithme génétique, les deux combinaisons (C,

Sélection	M	T	M	T	M	T
T_{lt}	1	1	10	10	25	25
Fonction objectif	2471,0	2664,7	2403,9	2697,5	2274,5	2529,1
Somme des retards	2229,6	2421,4	2163,3	2456,8	2033,6	2291,6
Somme des dépassements des autonomies	19,85	21,6	18,95	18,31	19,05	16,69
Borne inférieure (manutentionnaires)	5,99	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Borne supérieure (manutentionnaires)	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Borne inférieure (chauffeurs)	15,09	15,05	15,08	15,16	15,09	14,92
Borne supérieure (chauffeurs)	17,23	17,29	17,25	17,31	17,28	17,24
Nombre de demandes en retard	56,01	55,88	56,43	56,69	54	55,06
Nombre de demandes avec autonomie dépassée	1,6	1,7	1,77	1,55	1,73	1,43

TAB. 4.15 – Résultats des six meilleures combinaisons avec une population de 200 individus

M) et (C, T) pour un nombre d'itérations sans amélioration égal à 200, ont été sélectionnées. Pour l'algorithme tabou, les combinaisons ($Op_{mov} = 60$, $T_{lt} = 25$) et ($Op_{mov} = 80$, $T_{lt} = 25$) ont été choisies avec un nombre d'itérations sans amélioration égal à 10 000. Enfin, pour l'algorithme mémétique, l'opérateur de sélection est M, le nombre d'individus dans la population est égal à 200 et les deux tailles de la liste tabou testées sont 10 et 25. Le tableau 4.16 présente la comparaison de ces algorithmes en conservant pour chacun deux combinaisons. Pour les 100 instances, nous déterminons la moyenne Δ_i des écarts relatifs entre la meilleure solution trouvée pour toutes les combinaisons des algorithmes et la meilleure solution trouvée par la configuration i, l'écart type $\sigma(\Delta_i)$, le nombre d'instances pour lesquelles la combinaison i trouve la meilleure solution (Nb_{min}) et le temps moyen de résolution en secondes (Tps). Pour une comparaison plus fine, nous avons également ajouté le nombre d'instances pour lesquelles l'écart relatif est inférieur à 10% ($Nb_{\Delta \leq 10}$) et 20% ($Nb_{\Delta \leq 20}$).

Parmi ces algorithmes, la première combinaison de l'algorithme génétique et la dernière combinaison de l'algorithme mémétique semblent dominer les autres combinaisons et la recherche tabou. Cependant, l'algorithme tabou est la méthode la plus rapide et obtient des solutions dégradées d'au plus 4% en écart relatif moyen. L'algorithme mémétique est similaire à l'algorithme génétique aux vues des résultats de ce tableau 4.16. A priori, le temps passé par l'algorithme mémétique à améliorer les individus de la population par la méthode tabou au détriment d'un nombre moins important de générations de nouvelles populations ne permet pas d'obtenir des résultats significativement meilleurs que l'algorithme génétique. De plus, le temps de résolution de l'algorithme mémétique est au minimum doublé

Algo.	génétique	génétique	tabou	tabou	mémétique	mémétique
Combi.	(C, M)	(C, T)	$Op_{mov} = 60$ $T_{lt} = 25$	$Op_{mov} = 80$ $T_{lt} = 25$	$T_{lt} = 10$	$T_{lt} = 25$
$\Delta_i(\%)$	22,6	27,7	26,6	26,2	26,9	23,7
$\sigma(\Delta_i)(\%)$	16,4	18,0	14,7	14,1	18,7	18,4
Nb_{min}	19	6	7	7	19	20
$Tps(s)$	4881,26	5140,86	1441,36	1665,63	10979,82	12540,20
$Nb_{\Delta \leq 10}$	27	17	14	16	22	29
$Nb_{\Delta \leq 20}$	45	40	32	29	32	43

TAB. 4.16 – Comparaison des trois algorithmes

par rapport à l'algorithme génétique.

Enfin, les derniers résultats expérimentaux comparent la meilleure combinaison de l'algorithme mémétique avec une nouvelle hybridation assez simple entre l'algorithme génétique et la recherche tabou. Cette hybridation consiste à exécuter dans un premier temps l'algorithme génétique puis à appliquer la recherche tabou dans un deuxième temps à la meilleure solution trouvée par le premier algorithme. Les paramètres de l'hybridation correspondent aux paramètres de la meilleure combinaison de l'algorithme génétique, colonne 1 du tableau 4.16, et de la recherche tabou précisé par la colonne 4 du même tableau. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.17 de la même manière que les tableaux précédents.

Le tableau 4.17 montre que l'hybridation à deux de temps de l'algorithme génétique puis de la recherche tabou est plus performant que l'algorithme mémétique. La valeur de l'écart relatif moyen est diminuée de 10,3% grâce à cette nouvelle hybridation. Pour seulement un tiers de ces 100 instances, l'algorithme mémétique trouve une meilleure solution que cette hybridation avec un temps de résolution légèrement supérieur. Sur l'ensemble des critères de la fonction objectif, l'hybridation est principalement plus performante sur la somme des retards des demandes. Cependant, il serait intéressant d'augmenter encore le nombre d'itérations sans amélioration de l'algorithme mémétique pour étudier sa convergence vers de meilleures solutions. Soit l'algorithme n'a pas assez de temps pour continuer à améliorer la solution soit l'algorithme, dans l'état actuel, ne permet pas de trouver de meilleures solutions que l'hybridation. Dans ce cas, une étude sur la diversité de la population tout au long de la résolution pourrait montrer une convergence trop prématurée de la méthode, essentiellement causée par l'amélioration des individus par la recherche tabou. Dans ce cas, des techniques de gestion de diversité de la population, comme par exemple ceux menés dans les travaux de Prins et al. [161] et Sörensen et Sevaux [181], permettraient d'améliorer l'algorithme mémétique.

Algorithme	mémétique	génétique puis tabou
$\Delta_i(\%)$	16,2	5,9
$\sigma(\Delta_i)(\%)$	16,1	11,2
Nb_{min}	33	67
$Tps(s)$	12540,20	10479,63
Fonction objectif	2274,50	1949,73
Somme des retards	2033,60	1701,02
Somme des dépassements des autonomies	19,05	27,66
Borne inférieure (manutentionnaires)	6,00	5,99
Borne supérieure (manutentionnaires)	6,00	6,00
Borne inférieure (chauffeurs)	15,09	14,93
Borne supérieure (chauffeurs)	17,28	17,29
Nombre de demandes en retard	54,00	60,51
Nombre de demandes avec autonomie dépassée	1,73	1,99

TAB. 4.17 – Comparaison entre l'algorithme mémétique et une hybridation à deux temps

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés au problème d'optimisation des tournées des véhicules de la logistique du CHRU en considérant des hypothèses émises par le service de la logistique du CHRU et d'autres contraintes rendant le problème plus appliqué au contexte de l'étude. Les algorithmes présentés au chapitre précédent ont été modifiés de manière à prendre en compte ces nouvelles contraintes et hypothèses et à améliorer leurs performances. Un nouvel algorithme est également proposé, un algorithme mémétique, fruit d'une hybridation entre un algorithme génétique et une recherche tabou. Pour tester ces méthodes de résolutions, des nouvelles instances ont été générées en fonction de données réelles fournies par l'hôpital. Les résultats expérimentaux des trois algorithmes montrent que l'algorithme génétique est plus performant que la recherche tabou et domine légèrement l'algorithme mémétique. Au niveau du ratio de la qualité des solutions et du temps de résolution, la recherche tabou paraît être la meilleure méthode. De plus, des tests sur une hybridation à deux temps (algorithme génétique puis recherche tabou) montrent une efficacité supérieure à l'algorithme mémétique pour trouver de bonnes solutions.

D'autres améliorations peuvent être apportées aux algorithmes présentés dans ce chapitre. Des techniques de gestion de diversité de la population permettraient d'améliorer l'algorithme mémétique mais aussi l'algorithme génétique. Ces techniques consistent à s'assurer que les algorithmes ne convergent pas trop vite vers une unique solution ou "super-individu". Pour cela, il existe plusieurs méthodes : ajouter des nouveaux individus, refuser des individus enfants trop similaires aux individus déjà présents dans la population courante ou encore augmenter l'action de l'opérateur de mutation. D'autres choix des paramètres d'hybridation de l'algorithme mémétique peuvent être testés comme améliorer seulement les mauvais individus de la population par la recherche tabou ou encore changer le nombre d'itérations de cet algorithme en fonction de la qualité des individus. Pour la recherche tabou, des techniques d'intensification ou de diversification de l'espace de voisinage d'une solution permettraient de l'améliorer. Une phase d'intensification consiste à augmenter le nombre de voisins d'une solution lorsque la qualité de la solution courante est meilleure que la qualité moyenne des solutions parcourues. Et dans le cas contraire, les ensembles de voisinages des solutions courantes de moins bonnes qualités sont diminués. La phase de diversification permet de diriger la recherche vers des ensembles de voisinages pas ou peu visités. Elle consiste par exemple à appliquer plusieurs fois aléatoirement un opérateur de voisinage lorsqu'on estime que le voisinage courant ne contient plus beaucoup de nouvelles solutions intéressantes.

Ces méthodes de résolution permettent d'obtenir des solutions d'organisation des tournées de livraison et de répartition du nombre de chauffeurs et manutentionnaires. Cependant, le défaut de ces solutions est qu'elles sont basées sur des instances dont les données sont fixes. Dans le réel, les quantités des chariots de chaque demande sont souvent variables et les durées des trajets et temps de livraison ne sont pas constants. Il serait donc intéressant d'évaluer la robustesse de ces solutions dans un environnement dynamique avec des incertitudes. L'une des techniques adaptées à cette problématique est la simulation, objet du chapitre suivant.

Chapitre 5

Simulation du modèle appliqué

Ce chapitre est consacré au moteur de simulation de la logistique du CHRU Tours. Afin de présenter au mieux ce travail, une première section présente les objectifs de cette simulation ainsi que les motivations nous ayant mené à utiliser cette technique. Puis une deuxième section est dédiée à la modélisation du système simulé. Enfin, une dernière partie décrit l'implémentation et les résultats obtenus aussi bien sous forme numérique (statistiques) que visuelle (interfaces du logiciel).

5.1 Objectif de la simulation

La simulation numérique est un outil de la RO permettant de simuler des systèmes réels à l'aide de modèles, dont l'évolution est difficile à prévoir et à évaluer. Elle permet de fournir des estimations réalistes et d'évaluer différents scénarios (règles de gestions de ressource, dimensionnement de ressources, etc.). Ayant déjà fait ses preuves dans le monde de l'industrie (Law et Kelton [133]), elle a pour objectif d'aider le décideur à prendre des décisions importantes de logistique, de conception ou encore d'investissement, suite aux résultats d'une simulation sur différents scénarios. C'est pourquoi la simulation paraît être un outil parfaitement adapté pour tester et analyser différentes organisations de la logistique du CHRU, afin de décider de la meilleure. Il existe plusieurs types de simulation, nous nous intéresserons ici à la simulation à événements discrets (Fleury et al. [73]) qui permettrait de simuler parfaitement le système. Law et Kelton [133] définissent la simulation à événements discrets comme la modélisation d'un système dont l'état évolue au cours du temps selon une représentation dans laquelle les variables d'état changent à certaines dates précises. Il existe alors des périodes de temps durant lesquelles le système ne change pas d'état. A ces dates correspondent l'apparition d'événements qui sont susceptibles de faire évoluer l'état du système. Simuler un système discret, c'est tout d'abord définir le système et plus exactement le modèle de ce système avec ses entités interagissant, ses ressources, ses événements et ses états.

Cette simulation a donc objectif de tester et d'évaluer différentes organisations de la logistique du CHRU. Deux motivations nous ont amené à développer cet outil :

– La première est de tester les solutions trouvées par les algorithmes décrits précédem-

ment. Ces algorithmes permettent de trouver une bonne solution à partir de données statiques. Cependant, un certain nombre de paramètres aléatoires interviennent dans le réel et ces aléas peuvent dégrader une solution. Les paramètres aléatoires sont principalement le nombre de chariots à livrer ou à collecter, les durées de trajets entre hôpitaux ou entre bâtiments et le temps perdu lors d'une livraison ou d'une collecte, à attendre un ascenseur par exemple. La simulation vise donc dans un premier temps à tester la robustesse d'une solution trouvée par les algorithmes d'optimisation dans un environnement aléatoire.

– La deuxième motivation est de fournir un outil d'aide à la décision pour le personnel du CHRU chargé d'établir cette nouvelle organisation. Grâce à cet outil, ils peuvent eux-mêmes tester des organisations et orienter leurs choix en analysant les sorties du simulateur. Cette sortie est un ensemble d'indicateurs choisis judicieusement ou une visualisation graphique du résultat permettant de voir le déroulement du système dans le temps. Ainsi, suite à une simulation, il est possible d'apercevoir des défauts d'une organisation choisie, comme des goulots d'étranglements engendrant des retards importants dans les livraisons et d'en déduire des corrections sur certains choix stratégiques. Suite à ces corrections, de nouvelles simulations peuvent être lancées jusqu'à obtenir "la bonne organisation".

Le système mis en place est résumé par la figure 5.1. A partir de certaines données liées à la structure du CHRU, avec notamment les demandes des services en produits de la logistique, un module d'optimisation constitué des algorithmes précédents est capable de fournir une solution à l'organisation de la logistique. Le simulateur peut ensuite tester l'organisation dans un environnement aléatoire défini par les données du CHRU. Suite à cette simulation, les résultats obtenus peuvent être analysés et interprétés de manière à apporter des améliorations à l'organisation.

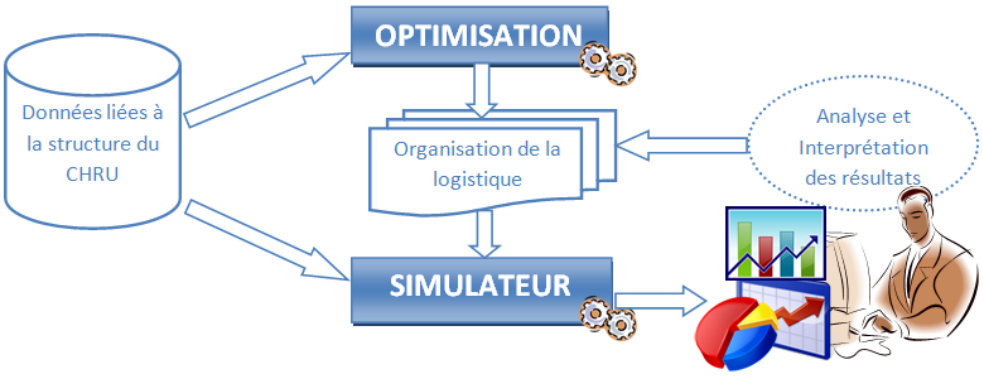


FIG. 5.1 – Système optimisation et simulation

L'idée d'appliquer la simulation à un environnement hospitalier n'est pas nouvelle. De nombreux articles en font état lors d'étude d'organisation hospitalière, voir (Jacobson et al., 2006 [104]) pour un état de l'art sur les simulations à événement discret appliquées au milieu hospitalier. Néanmoins la plupart de ces études portent sur les flux de patients, contrairement à cette étude. Nous proposons ici une simulation classique orientée événements dont l'environnement aléatoire est défini par des données stochastiques.

5.2 Modélisation du système

Simuler un système, c'est tout d'abord définir le système et plus exactement le modèle de ce système avec ses entités (c'est à dire les éléments qui interagissent), ses ressources (ex : véhicules, chauffeurs, etc.), ses événements et ses états. La phase de modélisation du système est l'étape la plus importante. Le principal dilemme est le choix du niveau de détail approprié. Un niveau de détail élevé mène à une représentation plus réaliste mais exige une connaissance fine du système et des données. De manière à décrire synthétiquement la modélisation du système simulé, cette section est décomposée en quatre parties : le système général, les entités du système, les ressources et les événements du simulateur.

5.2.1 Le système général

Le système représente donc la logistique du CHRU de Tours : tous les processus des tournées de livraison aussi bien entre hôpitaux qu'entre bâtiments de Bretonneau. Une partie des données du système et ses contraintes est décrite dans le chapitre 4 précédent. La simulation mise en place permet en plus de faire varier divers facteurs comme le nombre de chariots à livrer ou à collecter, les durées de trajets entre hôpitaux ou entre bâtiments et le temps perdu lors d'une livraison ou d'une collecte, à attendre un ascenseur par exemple. Les lois de distribution des quantités de chariots demandés sont établies empiriquement à partir de données réelles de l'hôpital portant sur plusieurs mois. Les durées de trajets suivent des lois normales. Enfin le temps perdu suit une loi uniforme entre 0 et 5 minutes. La simulation prend en plus les données d'entrée suivantes :

- le nombre de manutentionnaires et de chauffeurs, ainsi que leurs horaires de travail et de pauses,
- l'ensemble des tournées des véhicules de l'organisation à tester,
- des informations plus précises sur les demandes et points de livraison. Ces informations permettent un niveau de détail plus élevé que le modèle appliqué proposé au chapitre précédent. Chaque point de livraison du modèle précédent est divisé en plusieurs points de manière à symboliser des services ou groupements de services d'un même étage par exemple. Cette granularité permet d'être plus précis sur les temps d'accès aux services, les distributions empiriques des chariots demandés et les fenêtres de temps de livraison.

Pour évaluer la qualité d'une solution soumise à des perturbations aléatoires, un ensemble de critères et indicateurs de sortie ont été définis. Autres que les retards par demande de livraisons ou des dépassements d'autonomie de chariot repas, les taux d'occupation et d'utilisation des ressources sont calculés pour les quais, les véhicules, les fenwicks, et les manutentionnaires. Des indicateurs sur les retards des départs ou de fin des tournées, sur le nombre de chariots non livrés et sur les temps d'attentes des différentes ressources sont aussi calculés. Cet ensemble d'indicateurs étant déterminé à chaque réplication d'une simulation, ils sont représentés sous forme graphique ou numérique par des moyennes, écarts types, maximums et minimums. Enfin, une interface graphique a été développée pour suivre visuellement le déroulement des tournées aussi bien inter-hôpitaux qu'intra-Bretonneau.

5.2.2 Les entités

Les deux entités majeures du système sont les tournées inter-hôpitaux et les tournées intra-Bretonneau. Nous allons décrire les caractéristiques et le comportement de chacune de ces entités.

5.2.2.1 Entité d'une tournée inter-hôpitaux

Une tournée inter-hôpitaux est caractérisée par les attributs suivants :
- Un chauffeur affecté à cette tournée.
- Un véhicule réquisitionné pour la tournée.
- Un dépôt de départ et d'arrivée (celui du véhicule).
- Une liste ordonnée des dépôts par lesquels le véhicule doit passer afin de charger entièrement sa cargaison. A la fin de la livraison, le véhicule retourne à ces dépôts dans le sens inverse de manière à y déposer les chariots vides collectés.
- Une liste ordonnée des demandes à livrer. Cette liste définit donc l'ordre des points de livraison par lesquels le véhicule passe.
- Le jour de départ de cette tournée.
- L'heure au plus tôt du départ de la tournée.
- L'heure de fin estimée de la tournée. Cet attribut sert pour le calcul des critères d'évaluation de la simulation.

Le nombre de tournées inter dans le système est connu à l'avance. Le comportement de ce type d'entité est résumé par le diagramme d'états-transitions (Booch et al. [21]) de la figure 5.2. Les états de l'entité sont les suivants :
- Départ du véhicule : cet état initial apparaît lorsque la tournée doit commencer.
- Déplacement véhicule vers dépôt : cet état survient d'abord lorsque le chauffeur et le véhicule de la tournée sont disponibles. Une tournée peut donc être retardée si ces ressources sont prises par d'autres tournées. Puis, il intervient à chaque déplacement du véhicule vers un dépôt pour charger sa cargaison.
- Chargement : Cet état signifie que le véhicule charge les chariots qu'il doit livrer après s'être approprié une place. Ce chargement dure le temps que tous les chariots soient préparés et chargés dans le véhicule. Comme les nombres de chariots demandés sont variables, le nombre de chariots peut dépasser la capacité du véhicule. Si ce cas se produit, ces chariots resteront à quai et essaieront d'être insérés dans toutes les tournées suivantes qui passent par leurs points de livraison.
- Déplacement véhicule vers hôpital : Cet état symbolise le déplacement du véhicule vers un point de livraison et éventuellement l'attente d'une place à un quai à ce point.
- Livraison : Une fois le véhicule à quai, cet état apparaît. Sa durée est calculée en fonction du nombre de chariots à livrer et de leurs types ainsi que les points d'accès aux services (cf. temps total de livraison section 4.1 page 90). En plus de cette durée, un temps "perdu" variable est ajouté de manière à symboliser des perturbations aléatoires comme l'attente d'un ascenseur, une discussion entre chauffeur et infirmière, etc.
- Déchargement : cet état représente le déchargement aux différents dépôts de tous les chariots collectés lors de la livraison. Après le déchargement complet du véhicule, la tournée s'achève en libérant le chauffeur et le véhicule.

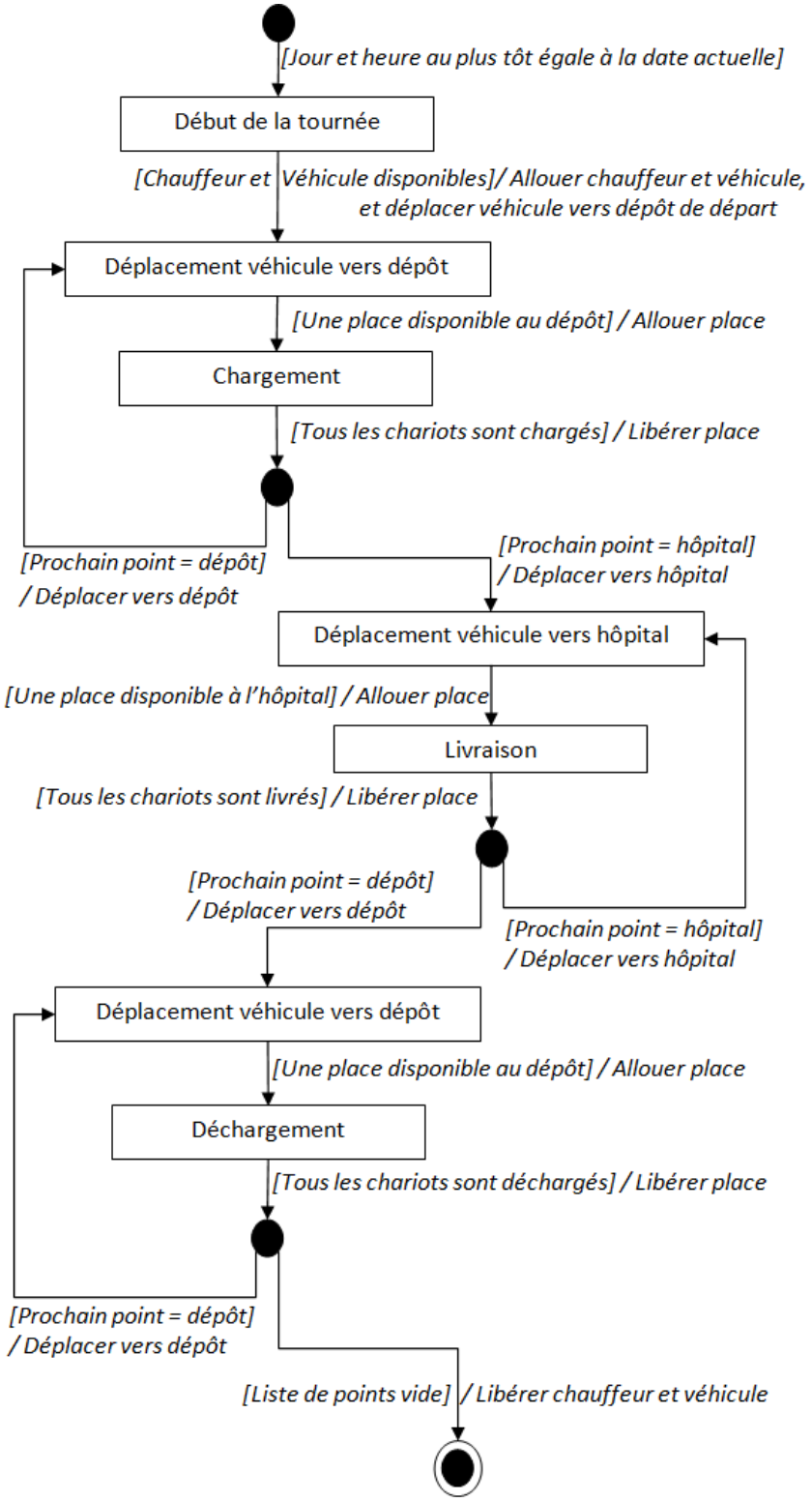


FIG. 5.2 – Diagramme d'états-transitions d'une tournée inter-hôpitaux

5.2.2.2 Entité d'une tournée intra-Bretonneau

Contrairement aux tournées inter, le nombre de tournées intra-Bretonneau dans le système n'est pas connu à l'avance. Elles sont créées dynamiquement en fonction de l'arrivée des chariots sur le quai. Les types de ressources qu'elles nécessitent sont les manutentionnaires et les fenwicks pour certaines d'entre elles. Le comportement de ce type d'entité est résumé par le diagramme d'états-transitions 5.3 (comme pour les algorithmes de résolution du chapitre précédent, il simule aussi le comportement du manutentionnaire présenté à la figure 4.2 section 4.2).

Les états de l'entité sont les suivants :

- Début de tournée : cet état initial apparaît lorsqu'une tournée intra peut commencer : des chariots sont à quai et un manutentionnaire est disponible pour livrer. Cette disponibilité prend en compte les horaires de travail des manutentionnaires, notamment l'heure de début de pause et de fin de travail. Si un manutentionnaire n'a pas assez de temps pour livrer au moins un chariot et revenir à quai avant son heure de début de pause ou son heure de fin travail alors il est considéré comme indisponible. Enfin, les états suivants ne pourront être valides que si des chariots sont livrables selon la condition (1) définie dans la section 4.2 ($l_{i,p,t}$ est la plus petite valeur parmi tous les chariots sur le quai à l'instant t, $e_{i,p,t} < t + \epsilon$ et $l_{i,p,t} < t + \alpha$). Le chariot ayant la plus petite date au plus tard de livraison est sélectionné.
- Recherche de fenwick : Cet état intervient lorsque le premier chariot sélectionné nécessite un fenwick pour son transport.
- Attente de fenwick : Cet état symbolise l'attente d'un fenwick devant arriver dans les λ minutes.
- Recherche un autre chariot : cet état apparaît lorsqu'aucun fenwick n'est disponible dans λ minutes. Le manutentionnaire peut alors livrer uniquement des chariots qui ne nécessitent pas de fenwick pour leurs transports.
- Compléter la tournée par d'autres chariots : Cet état symbolise la sélection d'autres chariots pouvant être livrés dans le même bâtiment que le premier choisi. Ils sont sélectionnés selon leur ordre de date de fin de livraison croissante, en fonction de la capacité disponible, en respectant la condition (1) et en s'assurant que la date de retour du manutentionnaire sera inférieure à sa date de fin de travail ou date de début de pause.
- Livraison : Tout comme l'état de livraison d'une tournée inter, cet état représente la livraison effective des chariots aux services. La durée de livraison est calculée en fonction du nombre de chariots à livrer et de leurs types ainsi que les points d'accès aux services (cf. temps total de livraison section 4.1 page 90), plus un temps "perdu" additionnel.
- Déplacement vers le quai : cet état indique le retour du manutentionnaire au quai lorsqu'il a terminé de livrer.

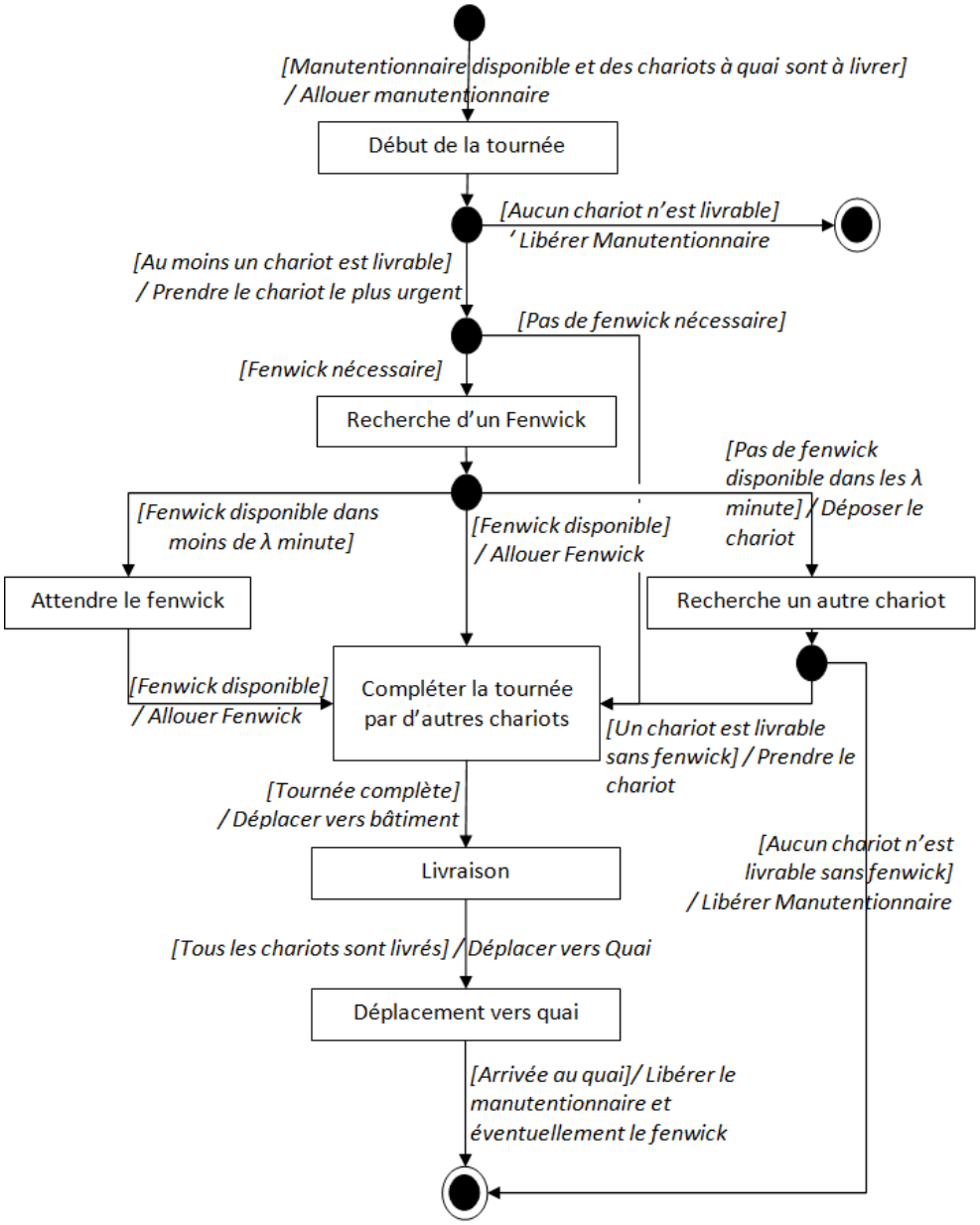


FIG. 5.3 – Diagramme d'états-transitions d'une tournée intra-Bretonneau

5.2.3 Les ressources

Dans le cas général, une ressource est soit consommable soit réutilisable. Elle se caractérise par une quantité disponible, un nombre ou une durée d'utilisation avant remplacement et des règles d'utilisation et d'accès. Dans notre modèle, les ressources réutilisables sont les places dans les quais, les personnes (chauffeurs et manutentionnaires), les véhicules et les fenwicks. Elles sont toutes limitées en nombre, avec en plus pour les personnes un nombre variable en fonction du temps (dépendant des horaires de travail). Les ressources consommables sont les chariots, ils sont produits dans les dépôts en respectant des temps de production et une heure au plus tôt de début de production. Ils sont consommés par les différentes tournées. Enfin, toutes ces ressources ont une règle commune d'utilisation et d'accès : FIFO (*First In, First Out*).

5.2.4 Les événements

L'une des étapes principales dans la conception d'un simulateur à événement discret est la définition de ces événements. Dans la plupart des systèmes, il existe plusieurs types d'événements. Chaque événement possède une logique de fonctionnement et engendre des changements d'états dans le système. Un événement peut également produire plusieurs événements. La gestion de ces événements est réalisée par l'échéancier, principal élément d'un moteur de simulation. L'échéancier n'est en fait que la liste des événements avec leurs dates d'occurrence. L'algorithme général et simplifié d'un moteur de simulation peut être le suivant :

- Initialisation de la liste des événements
- Tant qu'il reste des événements à traiter :
  - Prendre l'événement ayant la plus petite date d'occurrence t
  - Mettre à jour la date du système à t
  - Exécuter la ou les procédures liées à l'événement
  - Insérer éventuellement d'autres événements

Ces événements représentent chaque étape importante des tournées inter-hôpitaux et intra-Bretonneau. Pour les tournées inter-hôpitaux, viennent d'abord les événements liés aux débuts des tournées, dans les dépôts : attente des ressources (véhicule, chauffeur, et quai), puis chargement des chariots en fonction des contraintes de production. D'autres événements sont liés aux déplacements des véhicules entre les sites (hôpitaux et dépôts) : soit le véhicule doit continuer de charger sa livraison dans un autre dépôt, soit il peut commencer sa tournée de livraison ou collecte. Pour ces livraisons ou collectes, des événements permettent de gérer les occupations des quais sur la base du "premier arrivé, premier servi". Pour Bretonneau, les événements liés à une livraison correspondent au déchargement des chariots sur le quai et au chargement des chariots vides. Une fois que les véhicules ont terminé leurs tournées, des événements liés aux retours aux dépôts et à la libération des ressources sont générés. Les événements des livraisons à l'intérieur de Bretonneau sont plus simples. Une tournée commence soit à l'arrivée de chariots sur le quai, soit au retour d'un manutentionnaire, soit à l'heure d'embauche ou de retour de pause d'un manutentionnaire, soit lorsque des chariots à quai peuvent être livrés en validant la condition (1) de la sec-

tion 4.2. D'autres événements permettent de gérer l'attribution des fenwicks et l'attente de cette ressource. Enfin, des événements de fin de livraison des tournées de manutentionnaires permettent de libérer les ressources utilisées.

5.3 Implémentation et résultats

Le simulateur a été en partie développé dans le cadre d'un projet de fin d'étude (Peter Bardu [12]). Le langage utilisé pour l'implémentation est le *Java*. L'ordinateur utilisé pour les tests est un Intel(R) Core(TM) 2 CPU 2.00 GHz, 2.00 Go de RAM. Afin de tester le simulateur et de comparer les résultats obtenus avec ceux trouvés par l'un des algorithmes précédents, nous avons utilisé l'instance théorique présentée au chapitre précédent section 4.4.1. La simulation mise en place permet de faire varier les facteurs suivants : le nombre de chariots à livrer ou à collecter, les durées de trajets entre hôpitaux ou entre bâtiments et le temps perdu lors d'une livraison ou d'une collecte, à attendre un ascenseur par exemple. Les lois de distribution des quantités de chariots demandés sont établies soit empiriquement à partir de données réelles de l'hôpital portant sur plusieurs mois, soit par estimation à partir des tournées existantes. Les durées des trajets suivent des lois normales en se basant sur les durées moyennes des trajets réelles. Enfin, le temps perdu est nul de manière à pourvoir se comparer avec les résultats obtenus du chapitre (le temps perdu n'étant pas pris en compte dans ce chapitre bien qu'il suffirait de rajouter celui-ci dans les temps de livraison). En plus de toutes ces données, la simulation prend en entrée une solution trouvée par l'algorithme mémétique sur l'instance théorique. Cette solution est caractérisée par :

- 6 manutentionnaires et 23 chauffeurs ainsi que des horaires de travail compris entre 5h00 et 22h00,
- 192 tournées de véhicules caractérisées chacune par un numéro de véhicule, un chauffeur, une heure prévue de départ, et l'ensemble des demandes qu'elle doit traiter,
- et des numéros de jours pour les demandes qui ne sont pas affectées à un jour particulier.

L'évaluation par l'algorithme mémétique de cette solution est donnée par une valeur de la fonction objectif égale à 5360 avec un total des retards de 5028 minutes pour 65 demandes en retard.

5.3.1 Comparaison des résultats de la simulation et de l'algorithme

Le tableau 5.1 présente les résultats de 20 réplications de la simulation de l'instance théorique avec la solution trouvée par l'algorithme mémétique. Nous pouvons remarquer que la moyenne de la somme des retards des demandes est inférieure à celle donnée par l'algorithme. Cet écart s'explique par le fait que les quantités des chariots demandés qui sont générées dans la simulation, sont inférieures aux quantités de l'instance théorique résolues par l'algorithme (dans la résolution, nous avons pris des valeurs de demandes hautes afin que les tournées proposées soient réalisables le plus souvent possible). Cependant, le nombre de demandes en retard dans la simulation est légèrement supérieur. Sachant qu'il suffit qu'un chariot d'une demande soit en retard d'une minute pour que la demande soit comptabilisée en tant que demande en retard, les demandes livrées en début de tournée, dont l'horaire de livraison prévu par l'algorithme est proche de la date de fin souhaitée, peuvent facilement

se retrouver en retard lorsque le temps de trajet est plus élevé que prévu. La solution n'est donc pas fiable pour le nombre de demandes en retard. Il suffirait de réduire les fenêtres de temps de l'instance théorique résolue par l'algorithme pour trouver une solution plus fiable.

Temps d'une réplication	Sommes des retards des demandes				Nombre de demandes en retard			
	Moyenne	Ecart type	Max	Min	Moyenne	Ecart type	Max	Min
1,75 s	4829,90	155,17	5097	4411	68,55	4,34	75	57

TAB. 5.1 – Résultats de la simulation et de l'algorithme

5.3.2 Indicateurs fournis par le simulateur

Pour évaluer la qualité d'une solution soumise à des perturbations aléatoires, un ensemble de critères et indicateurs de sortie ont été définis, autres que les retards de livraisons ou les dépassements d'autonomie de chariots repas. Les taux d'occupation et d'utilisation des ressources sont calculés pour les quais, les véhicules, les fenwicks et le personnel. Pour chacune de ces ressources, des graphiques représentant les courbes de charges d'utilisation et des taux d'utilisation sont tracés en se basant sur les valeurs moyennes des différentes réplications. Les figures 5.4 et 5.5 illustrent ces graphiques pour le cas des fenwicks. D'après ces graphiques, nous pouvons en déduire qu'un quatrième fenwick à Bretonneau serait inutile.

Les autres indicateurs de la simulation concernent les tournées inter-hôpitaux. Pour chaque tournée, il est possible d'appercevoir sous forme de tableau ou de graphique, les moyennes des retards des départs des tournées ainsi que leur nombre, les moyennes des retards des fins des tournées et leur nombre et les taux de remplissages de chaque tournée (identique à ceux des véhicules). Le figure 5.6 présente ces informations sous forme de tableau pour le cas de la tournée numéro 58. Nous pouvons remarquer grâce à ce tableau que cette tournée commence en moyenne avec 14 minutes de retard mais se termine en moyenne avec 7 minutes d'avance. Son taux de remplissage est en moyenne de 80%, avec un maximum de 90%. La figure 5.7 illustre à l'aide d'un graphique les temps de retard moyens des fins de tournées le jeudi. Au cours de cette journée, six tournées se terminent en retard.

Enfin, d'autres interfaces graphiques ont été développées pour suivre visuellement le déroulement des tournées aussi bien inter-hôpitaux qu'intra-Bretonneau (cf. figure 5.8 et 5.9). Un curseur agissant sur la vitesse de déroulement des tournées permet d'accélérer ou de ralentir cette visualisation et de s'intéresser aux périodes que l'on désire suivre attentivement. Par exemple, elle permet de s'apercevoir d'un nombre important de véhicules arrivant au même moment en un même point de livraison.

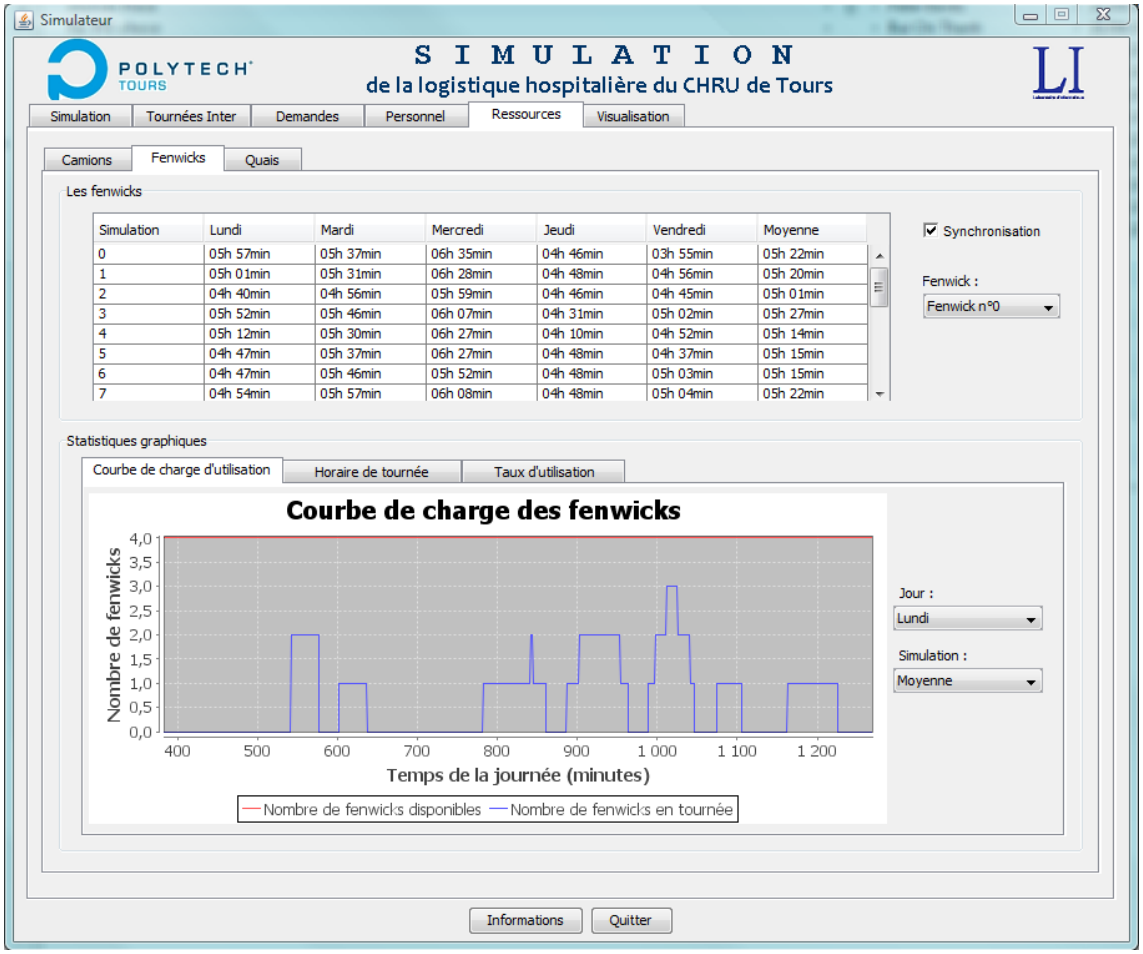


FIG. 5.4 – Courbes de charges d'utilisation des fenwicks

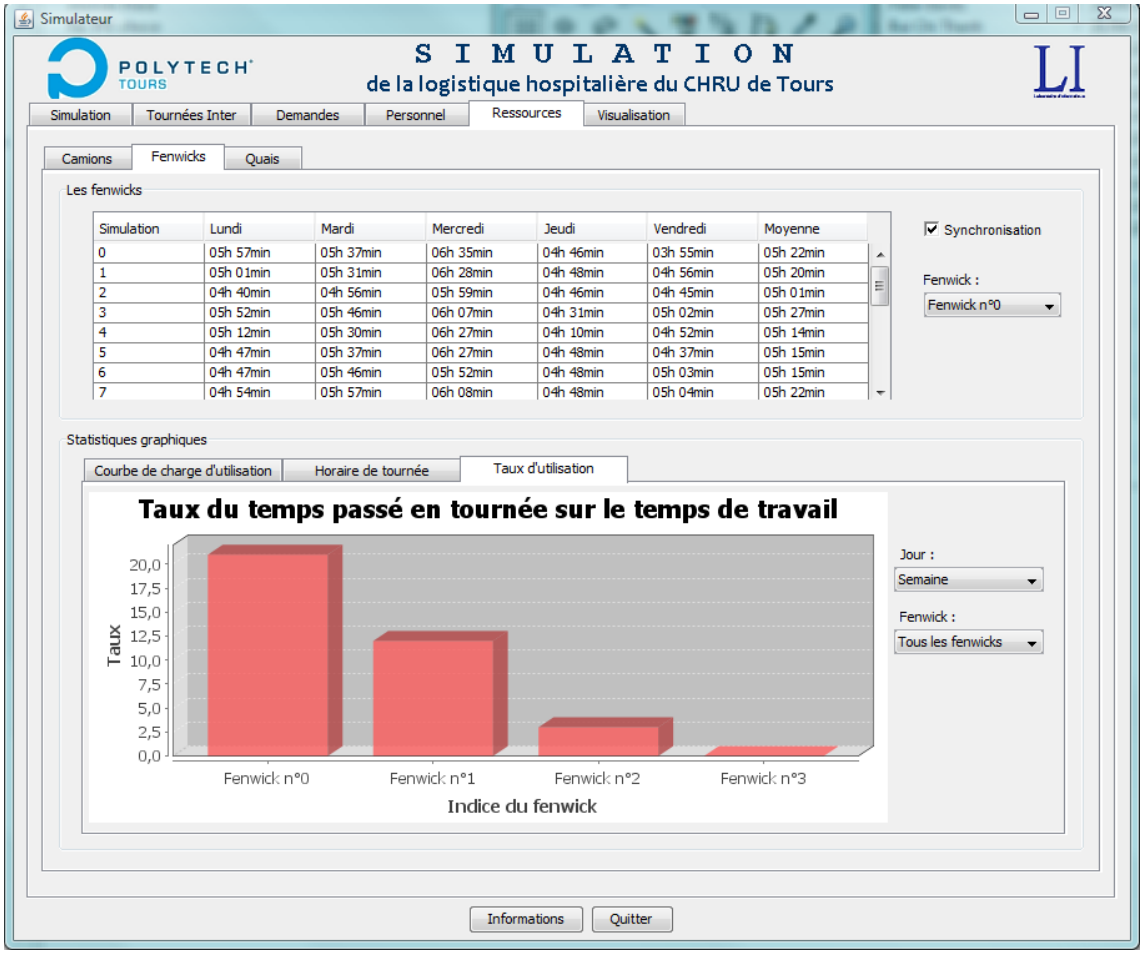


FIG. 5.5 – Taux d'utilisation des fenwicks

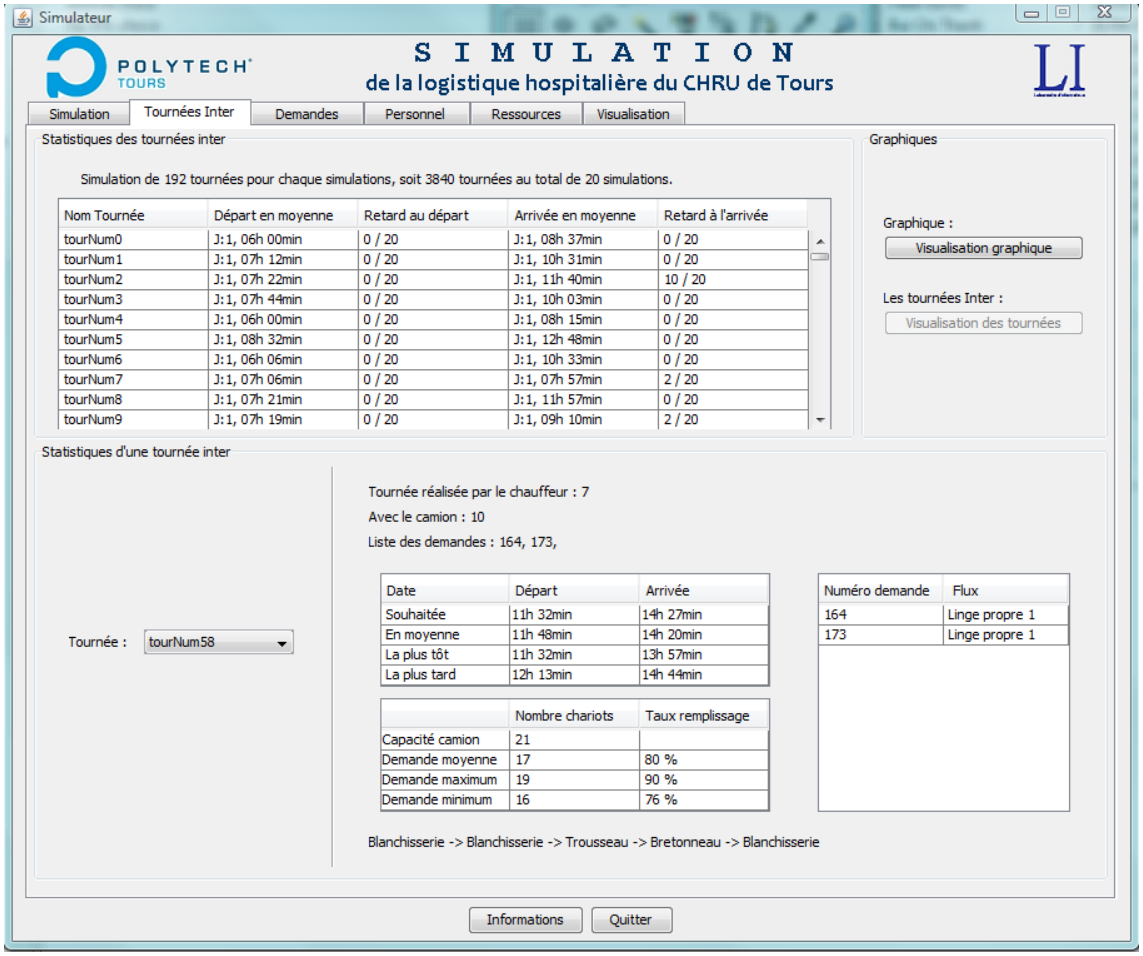


FIG. 5.6 – Information sur la tournée numéro 58

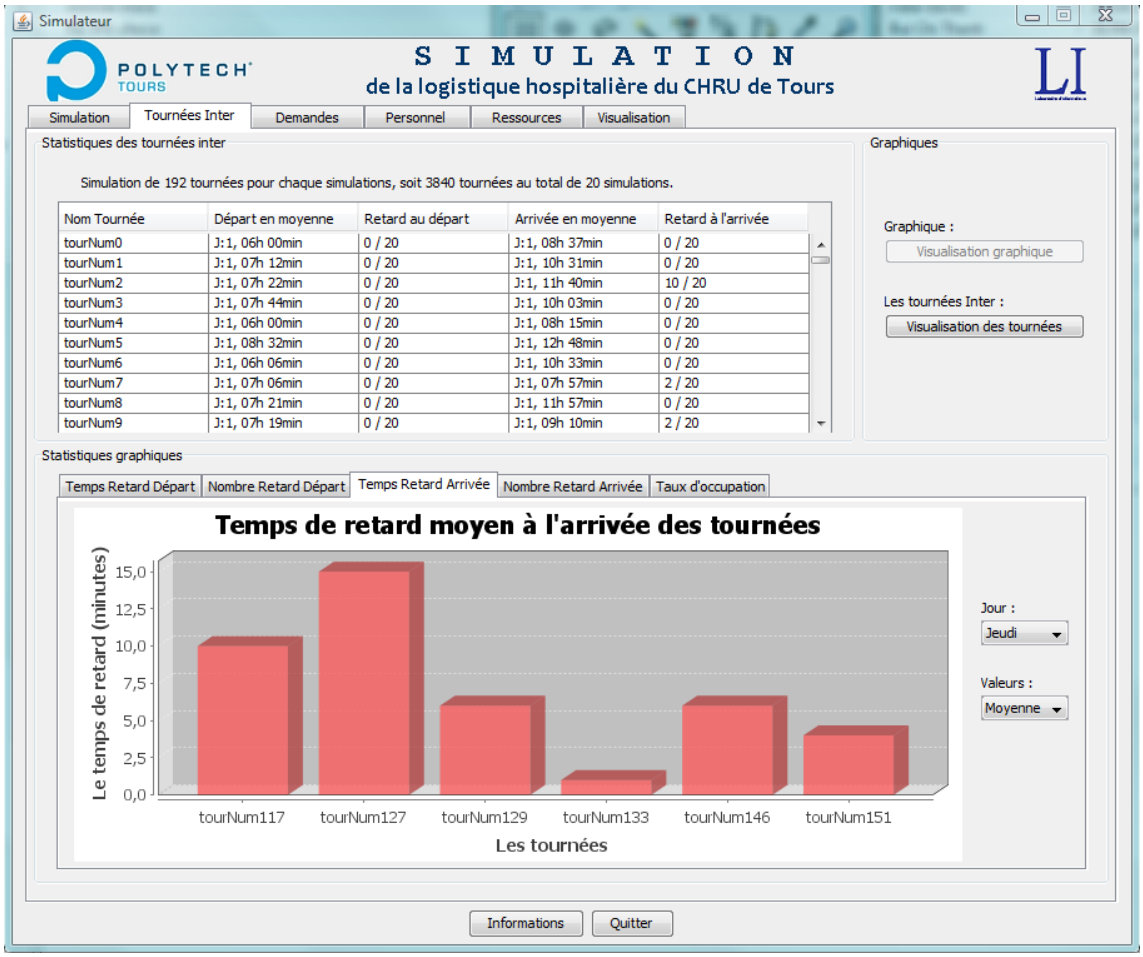


FIG. 5.7 – Temps de retard moyen des fin de tournées le jeudi

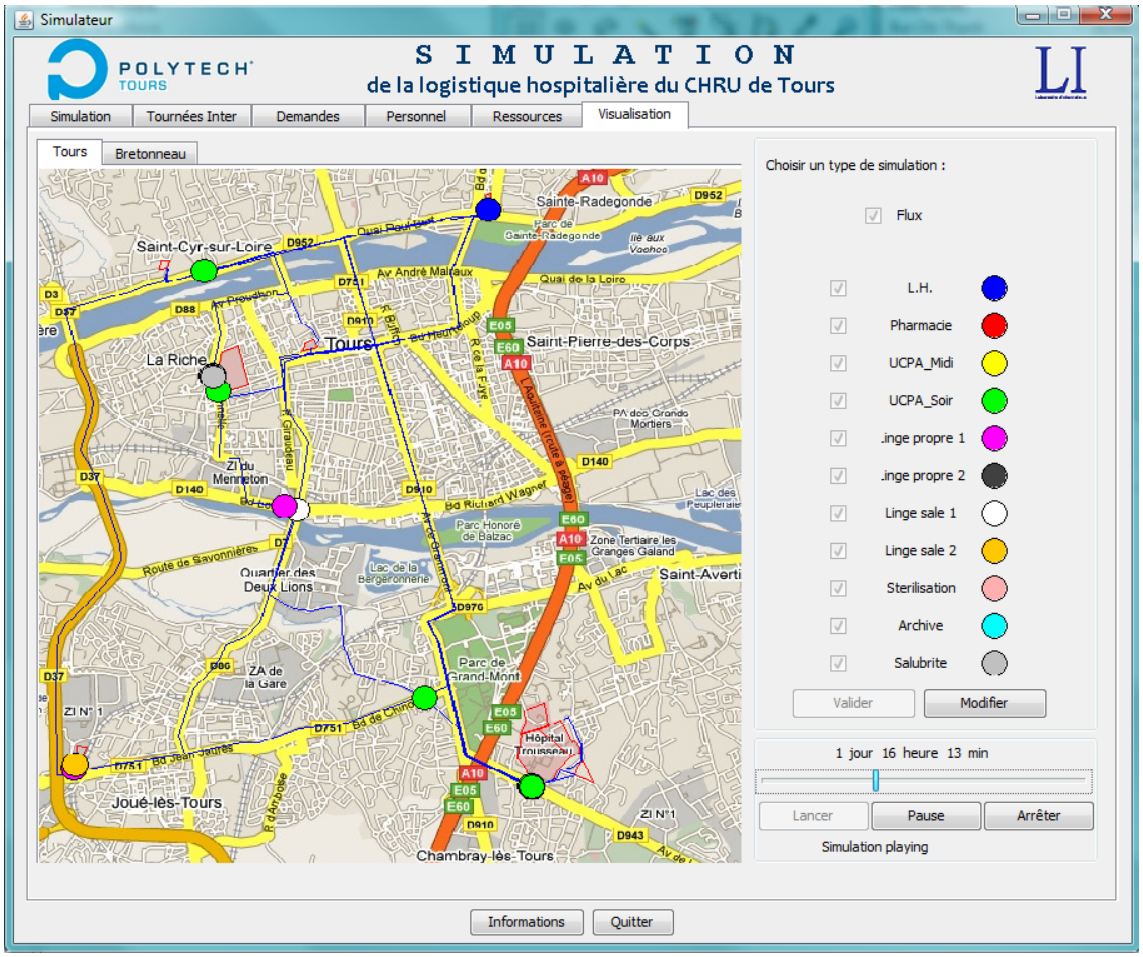


FIG. 5.8 – Visualisation des tournées inter-hôpitaux

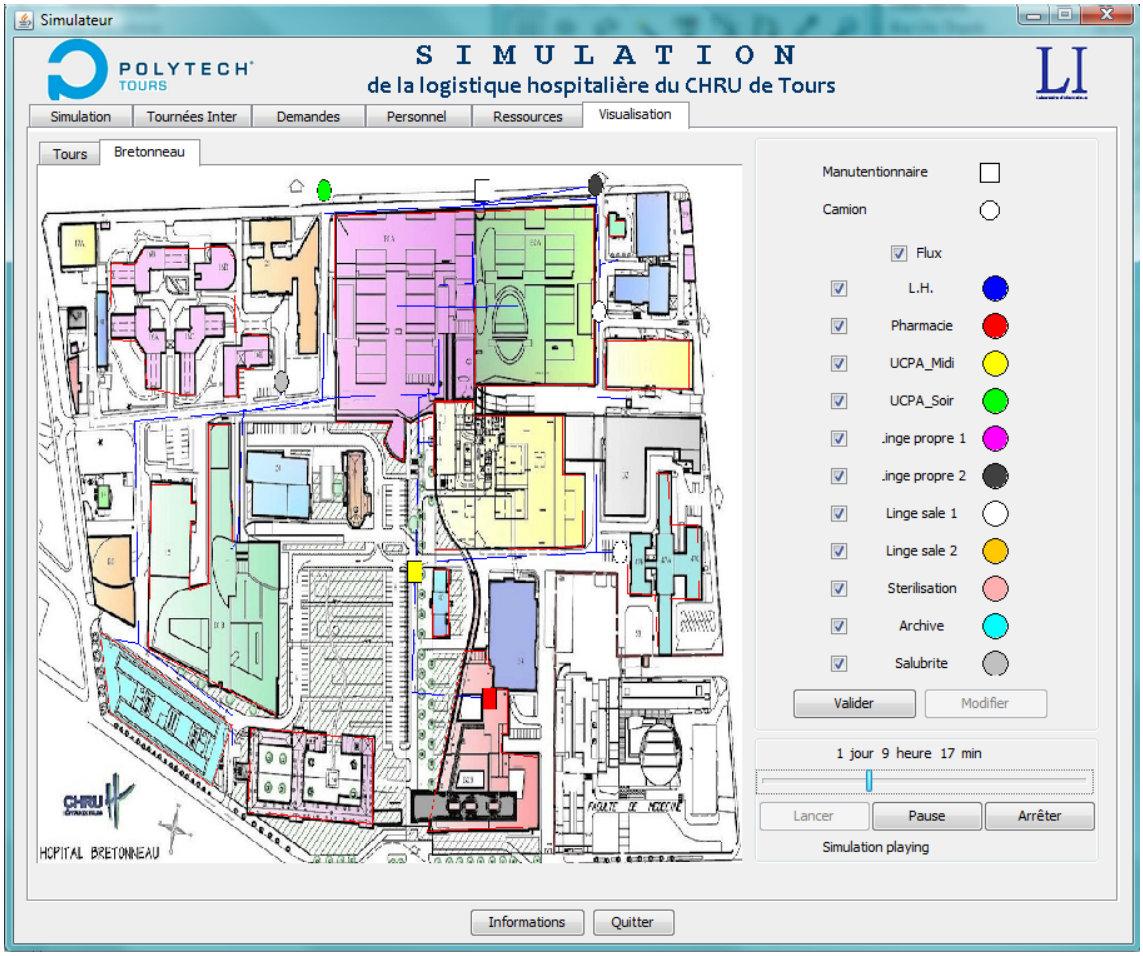


FIG. 5.9 – Visualisation des tournées intra-Bretonneau

5.4 Conclusion

La simulation est une technique fort utile pour tester une organisation dans un environnement aléatoire. Nous l'avons donc utilisée pour le problème de logistique du CHRU de Tours. Dans un premier temps, il a fallu modéliser le système à simuler (les entités, les ressources, les événements, etc.). Puis dans un deuxième temps, un moteur de simulation à événements discrets a été réalisé afin de tester la robustesse des solutions, trouvées par les algorithmes présentés dans le chapitre précédents, lorsqu'elles sont soumises aux événements aléatoires courants lors des tournées de livraisons et de collectes (distances aléatoires, durées incertaines, quantités de chariots variables, etc.). Ce moteur de simulation permet également aux personnes de la logistique du CHRU de tester leurs propres solutions. Pour évaluer la qualité d'une solution d'organisation, un ensemble de critères et indicateurs de sortie ont été définis et représentés sous forme graphique (retards de livraisons, dépassements d'autonomie de chariot repas, taux d'occupation et d'utilisation des quais, des véhicules, des fenwicks et des manutentionnaires et des chauffeurs). Enfin, une interface graphique a été développée pour suivre visuellement le déroulement des tournées aussi bien inter-hôpitaux qu'intra-Bretonneau. Les résultats obtenus de cet outil sont très concluants. D'une part, l'évaluation des solutions simulées correspond globalement à celle calculée par les algorithmes d'optimisation. Mais d'autre part, ce panel d'interfaces graphiques de l'outil permet très rapidement d'analyser les défauts et les qualités d'une solution.

Il reste néanmoins à terminer la collecte des données, en particulier des distributions manquantes des quantités de chariots demandés pour pouvoir lancer la simulation à la suite des algorithmes d'optimisation et tester ainsi les solutions trouvées. Enfin, une perspective importante pour la suite de ce travail est de combiner l'outil de simulation avec les algorithmes d'optimisation, afin d'évaluer au mieux les solutions et d'en déduire des enseignements pour mieux diriger la recherche vers de meilleures solutions.

Deuxième partie

Le transport de patients

Chapitre 6

Position du problème

Ce chapitre définit, positionne et délimite le problème général du transport de patients au CHRU de Tours. Une première partie est consacrée à une description synthétique du problème auquel nous nous sommes intéressés. Une deuxième partie présente un état de l'art sur la littérature proche de notre problématique.

6.1 Présentation générale

Le problème général de transports de patients étudié dans ce contexte est double. D'une part, une question de dimensionnement, ou plus exactement de répartition du nombre d'ambulanciers entre le SAMU et la Centrale des ambulanciers, se pose. Mais d'autre part se pose aussi un problème d'affectation des transports de patients à réaliser aux véhicules du CHRU. Nous avons donc décidé de décomposer cette problématique en deux sous-problèmes. Le premier concerne uniquement la planification de transports de patients à la CA. Le second s'intéresse exclusivement à la répartition des ambulanciers. Ce choix de décomposition se justifie par le peu de flexibilité des décisions à prendre du côté du SAMU. Lorsqu'une demande de transport de patients, quelle qu'elle soit, arrive, le SAMU doit y répondre en peu de temps sans avoir un grand choix de décision. La planification de transports a donc peu de sens au SAMU, d'autant plus que les dates d'arrivées des demandes sont très aléatoires. Alors que dans le cas de la CA, non seulement les demandes sont connues un certain temps à l'avance mais il y a aussi une plus grande liberté de décision : appel au privé, choix de l'équipe, etc.. Nous nous sommes donc intéressés dans un premier temps au problème dynamique de transports de patients à la CA, puis au problème de dimensionnement et d'affection des ambulanciers.

6.1.1 Problème dynamique de transports de patients

Le problème abordé a pour objectif d'optimiser les tournées des ambulances de manière à minimiser les coûts de transports dépendant de deux facteurs principaux : les appels aux ambulances privées et les frais kilométriques. L'effectif des ambulanciers est supposé constant pour l'optimisation des tournées puisque le nombre d'ambulanciers est déterminé par le deuxième problème étudié. Néanmoins les demandes en ambulanciers émanant du

SAMU ne sont pas à négliger pour résoudre ce problème.

L'objectif est d'affecter les demandes de transports aux équipes ambulancières. Les équipes et leurs horaires de travail sont fixés à l'avance, mais de manière à être plus réaliste, quelques heures/minutes supplémentaires pourront être autorisés. Chaque équipe se voit affecter un lieu de départ et un véhicule à sa prise de fonction, mais elle pourra en changer en cours de journée en fonction des transports à effectuer. Il existe deux types de véhicules, les véhicules usuels, dits de type C et les véhicules médicalisés, dits de type A. Leurs nombres sont limités et chaque véhicule est assigné à un dépôt.

Les demandes de transports arrivent à la centrale au fil de l'eau durant toute la journée, elles peuvent se distinguer par le type de véhicule nécessaire et un caractère d'urgence. Certaines demandes proviennent des services de soins du CHRU, tandis que d'autres émanent du SAMU. Ces dernières ont la particularité d'être extrêmement prioritaires et de n'être connues que très peu de temps à l'avance. Une demande de transport de patient est caractérisée par un lieu de départ, un lieu d'arrivée, une durée de prise en charge du patient hors véhicule, une fenêtre de temps dépendante du niveau de priorité de la demande, et un type de transport. Il existe trois types de transports : classique, contagieux et médicalisé. Dans le cas classique, le transport peut être effectué par un véhicule de type A ou C. Dans le cas d'un transport contagieux, un véhicule de type C doit être utilisé et le véhicule doit être désinfecté par l'équipe avant de pouvoir être réutilisé. Cependant, étant donné que l'opération de désinfection dure une heure, l'équipe peut la différer et utiliser un autre véhicule en attendant de revenir plus tard réaliser la désinfection. Enfin, un transport médicalisé nécessite un véhicule de type A plus spacieux qui peut accueillir du matériel médical. Il s'agit de transports de patients dans un état critique avec la surveillance d'un médecin de l'unité de soins d'origine durant tout le trajet. Après le transport du patient, il faut ramener le médecin à son unité d'origine mais ce retour peut s'effectuer avec un autre patient pour gagner du temps.

Quand la charge de travail est plus importante que la capacité de réponse de la Centrale des Ambulanciers, les régulateurs font appel à des compagnies privées, mais cette sous-traitance induit un surcoût non négligeable qui dépend uniquement du trajet du patient. Ce coût peut donc être estimé pour chaque demande à l'avance. Chaque demande assurée par le CHRU engendre uniquement des frais kilométriques. Une solution du problème est donc une affectation des demandes aux véhicules du CHRU ou aux compagnies privées.

Même si toutes les demandes étaient connues à l'avance, la tâche ne serait pas simple. Or là, seuls 30% des transports sont programmés en début de matinée pour la journée même, les autres demandes de transports arrivent en temps réel. Donc un aspect dynamique apparaît en plus pour ce problème.

6.1.2 Dimensionnement et d'affection des ambulanciers

Le problème de dimensionnement et d'affectation des ambulanciers est fortement lié à l'activité aléatoire du SAMU. Ses interventions ne peuvent pas être connues à l'avance. Même si deux types d'activités jour et nuit se dégagent, les heures d'interventions et leur nombre sont difficiles à prévoir ou même à estimer. De plus, pour chaque intervention, plusieurs procédures se dégagent, selon la gravité, qui ne nécessitent pas les mêmes ressources. Des règles dépendant principalement de l'état du patient et des situations géographiques, déterminent le type de secours à envoyer et donc la nécessité d'ambulanciers ou non.

Le problème consiste à trouver la meilleure organisation pour le CHRU de Tours en terme de coût mais aussi de qualité de transport (temps d'attente, envoie de secours, etc.). Une organisation pour ce problème est définie par non seulement un nombre d'ambulanciers au SAMU et à la CA mais aussi par leurs horaires et par une politique de gestion des ambulanciers affectée au SAMU. Cette politique de gestion délimite les interventions possibles d'un ou plusieurs ambulanciers au SAMU : Peut-il faire du transport primaire ou secondaire ? Adulte ou Pédiatrique ? Enfin un autre point à déterminer dans cette organisation est le nombre d'ambulanciers envoyés par la CA suite à une demande de SAMU. Par défaut, les ambulanciers sont envoyés par paires puisqu'ils constituent une équipe pour la CA, mais d'après le SAMU un seul ambulancier est nécessaire pour la plupart des interventions.

6.2 Littérature autour de ce problème

Cette partie présente la littérature autour de ce problème, ou plus exactement de ces deux sous-problèmes qui ne sont pas de même nature. Le premier sous-problème appartient à la classe des problèmes de transports dont la littérature est abondante et s'enrichit chaque année. Alors que pour le deuxième problème, la littérature est très restreinte puisque ce problème est particulier et spécifique au contexte du CHRU de Tours. Cet état de l'art qui a pour objectif de situer le problème par rapport à la littérature existante est décomposé de la manière suivante :

- Problèmes de tournées sur arcs ;
- Problèmes de tournées sur noeuds ;
- Le problème du voyageur de commerce ;
- Problèmes de transports dans le milieu hospitalier.

Une introduction générale sur les problèmes de transports a été réalisée dans la section 2.2 du chapitre 2. Le problème dynamique de transports de patients appartient à la classe des problèmes de tournées de véhicules (à la catégorie des "Pickup and Delivery Problems"). Sur la figure 2.3 de la section 2.2, notre problème se situe entre le DARP (Dial A Ride Problem) et le SCP (Stacker Crane Problem). Si nous utilisons la notation présentée dans cette section, notre problème serait noté [1-1 | P/D | m]. Il existe deux grandes classes de problèmes de planification de tournées : les problèmes de tournées sur arc et les problèmes de tournées sur noeuds. Les paragraphes suivants présentent l'intersection non vide de chacune de ces classes avec le problème de transports de patients.

6.2.1 Problèmes de tournées sur arcs

Le problème de transports de patients peut être vu sous la forme d'un problème de tournées sur arcs. Il suffit de considérer un graphe défini par un ensemble de sommets (dépôts des véhicules, points de départ des patients, points d'arrivées des patients), un ensemble d'arêtes entre chaque sommet de manière à rendre le graphe connexe, et un ensemble d'arcs pour chaque demande de transport de patient du sommet origine vers le sommet destination. L'objectif est de trouver l'itinéraire de chaque véhicule tel que chaque arcs soit traversé une seule fois par un véhicule. Ce type de représentation se rapproche du problème du postier chinois mixte, du problème du postier rural mixte, ou encore du Stacker Crane Problem.

Le problème simple et classique de tournées sur arcs consiste à trouver dans un graphe non orienté un cycle passant par toutes les arêtes, ou dans le cas d'un graphe orienté un circuit passant par tous les arcs. Ce problème est connu sous le nom du problème du postier chinois ([92] ou [67]). La complexité de ce problème dépend du graphe. Pour un graphe uniquement constitué d'arêtes ou d'arcs, le problème est polynomial. Cependant pour un graphe constitué d'arêtes et d'arcs le problème (problème du postier chinois mixte) devient NP-Difficile comme le montre Papadimitriou [156] à l'aide d'une réduction pseudo polynomiale vers le problème 3-SAT. Le problème des k-postiers chinois mixtes, introduit par Pearn [158], est assez proche de notre problème. L'objectif de ce problème est de trouver, en minimisant un critère donné, les k routes des postiers partant d'un même sommet de départ dans un graphe sachant que chaque arc et arête fait partie d'au moins une route d'un postier. Dans les articles de Pearn [158] et Zhang [200], les auteurs montrent certains cas polynomiaux du problème : graphe avec uniquement des arcs, graphe avec uniquement des arêtes, ou encore d'autres cas dépendants de la parité du graphe, de son caractère "Eulérien", des distances , etc.

Cependant dans notre problème ces circuits doivent passer uniquement une fois par un sous-ensemble d'arc, c'est le cas du problème du postier rural mixte. Ce dernier consiste à trouver dans un graphe non orienté un cycle passant par un sous-ensemble d'arêtes, ou dans le cas d'un graphe orienté un circuit passant par un sous-ensemble d'arcs. Dans les articles de Romero [169] et Corberán et al. [41], des méthodes exactes pour résoudre ce problème avec seulement un postier sont présentées. Dans un autre article de Corberán et al. [40], deux méthodes heuristiques sont exposées : l'une est basée sur la résolution de problèmes de flot et d'appariement, et l'autre est une recherche tabou avec une phase d'intensification et deux niveaux de diversification. Ce même problème avec en plus des pénalités pour certains tours, voire des interdictions, a été étudié par Corberán et al. [39]. Dans cet article, il propose une transformation polynomiale en un problème de voyageur de commerce asymétrique et une heuristique de résolution basée sur deux autres heuristiques de la littérature sur ce problème sans les pénalités. Parmi les extensions de ce problème, il existe le problème du postier rural avec des "classes" de dates de fin (cf. [135]). Ces classes introduisent la contrainte suivante : à chaque arête est associée une date avant laquelle elle doit être parcourue par le postier. Dans l'article de Letchford et Eglese [135], les auteurs présentent un modèle de programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) pour ce pro-

blème et sa résolution par la méthode des plans sécants.

Le problème intitulé "Stacker Crane Problem" consiste à trouver un circuit de coût minimal passant par tous les arcs d'un graphe dont tous les sommets sont reliés entre eux par des arêtes. C'est un cas particulier du problème précédent. Il a été étudié dans un premier temps par Frederickson et al. [77], qui a montré la complexité du problème (NP-difficile par transformation avec le problème du voyageur de commerce). L'auteur a également mis au point une heuristique avec une garantie de performance de 4/3 (ratio d'approximation). Dans un article de Righini et Trubian [167], les auteurs proposent d'autres heuristiques avec des résultats théoriques pour chacune d'entre elles en considérant un cas plus général du problème (la possibilité d'inégalité triangulaire). Enfin dans l'article de Coja-Oghlan et al. [37], les auteurs s'intéressent à un cas particulier de ce problème, le "Stacker Crane Problem on trees", et mettent au point une heuristique qui, d'après eux, est très proche de l'optimal voire exacte.

Toutefois, les problèmes de transports à la personne avec des véhicules de capacité unitaire, sont très peu abordés dans la littérature sous cette forme de problème. De plus, les diverses extensions des problèmes à tournée sur arcs restent encore éloignés de notre problème de transports de patients en considérant toutes les contraintes.

6.2.1.1 Problèmes de tournées sur noeuds

Les problèmes de tournées sur noeuds sont beaucoup plus étudiés dans la littérature que les problèmes de tournées sur arcs. La famille des problèmes de tournées sur noeuds pour le transport de personnes est appelé *Dial a Ride Problem* (DARP). Ce problème consiste à déterminer les tournées de véhicules pour transporter toutes les personnes de leurs lieux de départ vers leurs lieux de destination en respectant la capacité des véhicules. Ce problème est aussi basé sur un graphe généralement connexe et dont les sommets correspondent aux lieux de départs et d'arrivées des personnes.

Le DARP est un problème particulier du VRPPD ("*Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery*"), une des premières études sur ce problème a été réalisée par Stein [182]. Contrairement aux VRPPD, les DARP s'appliquent aux transports de personnes et non de marchandises. Cette particularité se traduit par la restriction suivante : une personne à transporter a un seul sommet de départ et un seul sommet de destination possible. L'une des premières études sur le DARP a été réalisée par Psaraftis [162] pour le cas d'un seul véhicule, et Jaw et al. [105] dans le cas de plusieurs véhicules. Une étude complète et assez récente sur la littérature des DARP (modèles et algorithmes) est disponible dans l'article de Cordeau et Laporte [44]. Dans cet article, les auteurs rappellent les trois modèles mathématiques existants avec leurs résolutions optimales :

- Cordeau [42] formule ce problème sous forme de PLNE en prenant en compte deux dépôts, une quantité de personnes à chaque sommet, une durée de service à chaque sommet, une capacité pour chaque véhicule, un temps de trajet maximal pour chaque véhicule, un coût de transport pour chaque arc dépendant du véhicule, un temps de trajet maximal pour chaque personne, et des fenêtres de temps pour chaque demande.

La fonction objectif est de minimiser la somme totale des coûts de transports. L'auteur propose une procédure par séparation et évaluation pour résoudre ce problème.
- Ropke et al. [170] présentent quant à eux deux modèles résolus aussi à l'aide d'une procédure par séparation et évaluation. Leurs modèles tiennent compte d'une flotte de véhicules homogènes, de fenêtres de temps, un temps de trajet maximal pour chaque personne, et une quantité de personnes à chaque sommet. L'objectif est aussi de minimiser la somme totale des coûts de transports.
- Enfin la dernière formulation concerne uniquement le problème d'ordonnancement des visites des clients dans une seule route : déterminer la séquence des clients assurés par un véhicule qui minimise son temps de trajet. Etant donné un véhicule, le but est de calculer l'heure de départ du dépôt et le temps de début de chaque service à chaque sommet de la route tel que les fenêtres de temps soient respectées et la durée de route minimisée [174].

De nombreux problèmes appartenant à la famille des DARP avec plusieurs véhicules ont été étudiés. Dans l'article de Cordeau et Laporte [43], les auteurs considèrent ce type de problème avec des fenêtres de temps pour les demandes, des capacités propres à chaque véhicule, et des durées de trajets maximales aussi bien pour les personnes que pour les véhicules. Ils proposent une recherche tabou pour résoudre ce problème. Durant la recherche de solutions, des solutions irréalisables (qui violent la contrainte des capacités du véhicule ou des fenêtres de temps) peuvent être explorées. L'évaluation des solutions est une combinaison linéaire entre la somme des coûts de chaque route et de fonctions évaluant le niveau des contraintes violées. Les coefficients de la combinaison linéaire affectés à ces fonctions augmentent avec le nombre d'itérations de manière à obtenir une solution réalisable à la fin de l'algorithme. Sachant qu'une solution est représentée par un ensemble de couples : numéro de véhicule et numéro de demande de transport, l'opérateur de voisinage consiste à changer le numéro de véhicule d'un couple. Cette opération revient à supprimer un sommet d'une route et à l'ajouter dans une autre route selon une procédure basée sur le calcul du "*forward time slack*" d'un sommet (cf. [174]). Tout le voisinage d'une solution n'est pas exploré entièrement, une règle s'appuyant sur des sommets critiques permet de diminuer l'ensemble des solutions à explorer. Enfin, en plus du critère d'aspiration (rendre possible l'exploration de solution tabou si elle améliore la meilleure solution trouvée), la recherche tabou possède une phase de diversification (forcer la recherche de solutions vers d'autres voisinages pas encore ou peu explorés).

Une autre étude se basant sur les mêmes contraintes du problème précédent, excepté le temps de trajet maximal, a été menée par Rekiek et al. [166] dans un contexte de transport de personnes handicapées. La problématique est la suivante : étant donné plusieurs dépôts avec pour chacun une zone de couverture des demandes, l'objectif est de satisfaire toutes les demandes en minimisant le nombre de véhicules. Les auteurs proposent un algorithme génétique pour résoudre ce problème. Chaque solution est décomposée en plusieurs gènes caractérisés par un véhicule et les sommets des demandes qu'il dessert. L'opérateur de croisement consiste à prendre aléatoirement une sous séquence de gènes d'un parent afin de l'insérer aléatoirement dans la séquence d'un autre parent, puis d'appliquer un opérateur de réparation. Ce dernier élimine les sommets doublons et réinsère les sommets manquants.

L'opérateur de mutation permet soit de créer aléatoirement des nouveaux groupes de véhicules, soit d'en éliminer, soit d'échanger les sommets entre gènes (véhicules). Une procédure regroupant les gènes de bonne qualité en les déplaçant est aussi implémentée afin d'augmenter la chance de les diffuser dans les individus de la génération suivante. La fonction objectif de ce problème est de maximiser la moyenne au carré de "l'efficacité des véhicules", calculée comme un ratio entre la durée réelle de la route d'un véhicule sans compter les attentes et la durée maximum de la route.

Parmi les méthodes de résolutions performantes, il existe les méthodes à deux phases comme par exemple celle proposée par Dumas et al. [65]. La première phase consiste à créer des groupes de personnes dans la même région à servir approximativement au même moment. Ces groupes sont ensuite combinés pour former le parcours des véhicules en se basant sur une technique de génération de colonnes. Enfin, la deuxième phase réordonnance chaque route des véhicules en utilisant des algorithmes de la littérature avec un unique véhicule. Les auteurs ont réussi à résoudre facilement des instances avec 200 personnes à transporter, cependant les grandes instances exigent l'utilisation d'une technique de décomposition spatiale et temporelle des données pour éviter un temps de résolution trop important. La phase de formation des groupes a ensuite été reprise et améliorée par Desrosiers et al. [58]. Les résultats obtenus sont établis sur des jeux de données comprenant près de 3000 personnes. Enfin, Ioachim et al. [103] ont montré l'avantage, en terme de qualité de solution, à recourir à une technique d'optimisation par construction de groupes.

Borndörfer et al. [22] s'intéressent à ce même type de problème avec un contexte de transports de personnes handicapées (nommé *Telebus Berlin*). Ils proposent une heuristique basée sur une approche de partition d'ensembles en deux étapes. La première étape consiste à regrouper les demandes de transports tel que le véhicule associé au traitement de ces demandes contienne toujours au moins une personne lors de son trajet. L'objectif de cette étape est de réduire la taille des instances du problème en utilisant au maximum les capacités des véhicules. Ces ensembles de demandes sont construits en minimisant les distances des trajets des véhicules. Ce problème de partitionnement d'ensembles est résolu de manière optimale. La seconde étape consiste tout d'abord à construire un chaînage de chaque demande d'un même groupe de manière qu'un véhicule puisse assurer cette route en respectant toutes les contraintes. Ensuite, un autre problème de partitionnement d'ensembles, résolu aussi de manière optimale, intervient. Celui-ci a pour but de trouver le meilleur sous-ensemble de routes parmi toutes les routes réalisables énumérées par combinaison des groupes, en répondant à toutes les demandes et en minimisant les distances parcourues par les véhicules. Les deux problèmes de partitionnement d'ensembles sont résolus à l'aide d'une procédure par séparation et évaluation.

Dans un article de Xiang et al. [196], une autre approche est présentée pour la résolution d'un DARP avec fenêtres de temps, durées de trajet maximales pour les véhicules et les personnes, et différents types de véhicules (chaque type de véhicule ne peut desservir qu'un ensemble de demandes). En plus, les auteurs considèrent encore d'autres contraintes concernant les chauffeurs : temps maximal de travail dans une journée, temps de pause obligatoire, et compétence à pouvoir conduire un type de véhicule. Les auteurs définissent

un temps d'attente pour chaque personne en fonction de l'arrivée du véhicule et de la fenêtre de temps au sommet départ de la demande. Leur fonction objectif est de minimiser la somme des coûts suivants : les coûts des trajets, les coûts kilométriques, les coûts d'attentes des personnes, et les coûts de temps des transports. Ces coûts prennent en compte les différents types de véhicules et le temps de travail des conducteurs. L'heuristique mise au point par les auteurs pour résoudre ce problème est basée sur le principe d'une recherche locale. Elle est traditionnellement constituée des étapes suivantes : pré-processing, construction d'une solution initiale, recherche de la meilleure solution dans un voisinage de la solution courante avec diversification puis intensification, et si la solution trouvée peut être encore améliorée alors on retourne à l'étape de recherche dans le voisinage. L'étape de pré-processing consiste à réduire l'espace de solutions en déduisant des circuits impossibles en fonction des fenêtres de temps, des distances, des types de véhicules, etc.. Puis une première solution est construite en deux phases. La première phase ordonnance tous les sommets en fonction des fenêtres de temps. Et la seconde phase groupe ces sommets en différents trajets de manière à respecter les contraintes des fenêtres de temps dans un premier temps, puis des autres contraintes dans un deuxième temps (comme ceux des temps de travail des conducteurs). L'étape suivante est une recherche locale avec une diversification pour sortir des optima locaux. La recherche locale est basée sur les opérateurs suivants : suppression d'une ou deux demandes de transports dans un même trajet et insertion de la ou les demandes dans un autre trajet, ou échange de deux demandes entre deux trajets. Ces opérateurs sont appliqués successivement jusqu'à ce qu'ils ne puissent plus améliorer la solution courante. La phase de diversification change le mécanisme de recherche en fonction d'une deuxième fonction objectif s'appuyant sur les temps d'attentes des personnes uniquement. Enfin, la dernière étape consiste en une intensification de la recherche en échangeant des sous-ensembles de trajets entre véhicule.

Wong et al. [195] abordent le même type de problème. L'objectif est de minimiser une combinaison linéaire entre le temps total de l'opération, le temps de trajet pour chaque personne, et des coûts fixes par demande de transport non assurée. La raison pour laquelle les véhicules ne sont pas tous identiques, et qui est valable pour la plupart des cas d'études, provient de la possibilité d'accueillir des fauteuils roulants dans certains véhicules. Les auteurs proposent une procédure d'insertion parallélisée pour résoudre ce problème. Dans un premier temps, les demandes de transports sont toutes classées en fonction d'un indice. Cet indice mesure pour chaque demande les difficultés à l'insérer dans la route d'un véhicule et les désagréments causés aux autres demandes assurées par ce véhicule si l'insertion est effectuée. Dans un deuxième temps, ces insertions dans les routes de chaque véhicule sont réalisées en fonction des indices de telle sorte que les demandes les plus difficiles à placer soient les premières à être insérées. Puis, une phase de post optimisation a été implémentée de manière à améliorer la solution en échangeant des demandes entre différentes routes. Les auteurs ont montré que la méthode proposée est efficace en la comparant avec des algorithmes classiques de la littérature.

Parmi les méthodes souvent utilisées pour résoudre ce type de problème, l'algorithme génétique connaît un grand succès. Par exemple Cubillos et al. [49] présentent plusieurs algorithmes génétiques pour le DARP. Leur fonction objectif est de minimiser le coût engen-

dré par les véhicules (temps des trajets, kilomètres parcourus, etc.) et la qualité du service de transport aux personnes (temps d'attente, temps supplémentaire du transport, etc.). Le codage de l'individu, ou solution, est une liste ordonnée de passagers pour chaque véhicule sachant qu'un passager est composé de deux attributs : le sommet origine et le sommet de destination. Pour générer la population de départ, deux initialisations sont proposées : aléatoirement et par insertions successives. La sélection pour les générations suivantes s'effectue par tournois. Les opérateurs de croisement proposés sont soit le croisement en un point soit le "Partial Match Crossover" (similaire à un croisement en deux points). Ils utilisent deux opérateurs de mutation couramment utilisés dans la littérature : "bit level" et "2-opt operator". Pour terminer, les auteurs exposent les résultats de différents algorithmes génétiques construits à partir de combinaisons entre les opérateurs proposés et les initialisations possibles.

Outre les algorithmes génétiques et les recherches tabou, il existe encore d'autres heuristiques pour résoudre ce type de problème, comme par exemple celle de Luo et Schonfeld [138] qui proposent une méthode appelée "heuristique par rejet et insertion". L'objectif, ici est de minimiser le nombre de véhicules utilisés sous contrainte de satisfaire toutes les demandes et d'assurer un service de qualité.

Les articles précédents supposent la connaissance de toutes les données du problème avant sa résolution (problème statique). Cependant, comme c'est le cas pour le problème de transports de patients, toutes les données ne sont pas connues à l'avance : les demandes de transports arrivent en temps réel (problème dynamique). Récemment, un état de l'art sur les problèmes dynamique de "*pickup and delivery*" est disponible dans Berbeglia et al. [18], une section de cet article est dédiée sur les DARP dynamiques. Parmi les premières applications, nous pouvons citer Madsen et al. [139] qui se sont intéressés au cas dynamique des transports de personnes handicapées. En plus des contraintes des fenêtres de temps et d'une flotte hétérogène, des contraintes de capacités multidimensionnels et des priorités entre clients sont à prend en compte. Les auteurs proposent une heuristique de type insertion, nommé REBUS, pour résoudre le problème dans un environnement dynamique et de manière rapide. Coslovich et al. [46] se sont intéressés à ce type de problème avec un seul véhicule et des demandes caractérisées par des fenêtres de temps. La nature dynamique du problème provient des nouvelles demandes de transports qui arrivent lors de l'arrêt du véhicule (le chauffeur peut accepter ou non la demande). L'objectif du problème est d'insérer dynamiquement autant que possible de nouvelles demandes en plus de toutes celles planifiées, en tenant compte : d'une règle de priorité entre les nouvelles demandes et de la mesure d'insatisfaction (dépendant de la déviation du temps de service désiré, du temps d'excès de voyage et du retard). L'algorithme proposé ne se base pas uniquement sur la route actuelle du véhicule mais sur un ensemble de routes calculé à partir d'opérateurs de voisinages. A chaque nouvelle demande, une première phase consiste à essayer d'insérer la destination du client dans toutes les routes de l'ensemble. Si cette destination peut être insérée alors le chauffeur accepte le client sinon il le refuse (le temps de réponse est important). La deuxième phase se déroule après l'acceptation d'un client et pendant le déplacement du véhicule. Elle repose sur une recherche locale appliquée sur l'ensemble des routes.

Une autre approche de ce problème dynamique a été présentée par Teodorovic et Radivojevic dans [187] avec une flotte de véhicules homogène et un seul dépôt. Contrairement à l'étude précédente, les nouvelles demandes peuvent arriver à n'importe quel instant. L'objectif du problème est de trouver à quel véhicule les affecter et à quelle place les insérer dans les routes. Les auteurs proposent deux algorithmes pour résoudre ce problème. Le premier trouve l'affection d'une demande à un véhicule en minimisant les distances totales parcourues des véhicules et leurs temps d'attente. Le deuxième algorithme réordonnance toutes les routes des véhicules de manière à minimiser le temps et les distances totales des détours. Ces algorithmes s'appuient sur la logique floue.

Attanasio et al. [7] ont proposé une recherche tabou parallélisée pour résoudre un DARP dynamique avec plusieurs véhicules, des demandes caractérisées par des fenêtres de temps, et des temps de trajet maximal aussi bien pour les voyageurs que pour les véhicules. Les demandes de transports arrivent au fur et à mesure, et l'objectif est d'en satisfaire un maximum. La recherche tabou utilisée pour une parallélisation est basée sur celle de Cordeau et Laporte [43] pour le cas statique. L'idée de leur algorithme dynamique est la suivante :

- Une première solution statique est déterminée avec les demandes connues à l'avance. La génération d'une solution statique est réalisée à partir de la recherche tabou (TS) avec deux approches différentes dépendant de l'hypothèse sur la capacité des véhicules, l'une fixe cette capacité (SS1), l'autre essaye de la diminuer (SS2).
- Lorsqu'une demande arrive, l'algorithme recherche une solution réalisable, et la demande est rejetée si aucune solution réalisable n'est trouvée.
- Puis une post optimisation est effectuée pour améliorer la solution (TS).

Plusieurs parallélisations sont proposées avec différentes structures. Crainic et al. [48] présentent une classification selon trois critères d'une parrallélisation de TS :

- "Search ControlCardinality" : combien de processeurs effectuent la recherche (1-C,2-C, ..., p-C),
- "Search Control Type" : le type de communication entre les processeurs (Asynchrone ou Synchrone), dans le cas asynchrone soit la solution peut être envoyée seule (C) soit avec en plus un certain nombre d'informations (KC),
- "Search Differentiation" : comment se comporte la recherche :
  - SPSS : un seul point de départ et une seule stratégie de recherche, ou encore les processeurs commencent avec une même solution initiale et exécute la recherche de la même manière,
  - SPMS : un seul point de départ mais plusieurs stratégies de recherche (à l'aide de plusieurs algorithmes, ou avec un même algorithme avec différents paramètres),
  - MPSS : multi-points de départ (chaque processeur part d'une solution initiale différente) et une seul stratégie de recherche,
  - MPMS : multi-points de départ et plusieurs stratégies de recherche.

Dans leurs articles, Attanasio et al. ont implémenté deux types de parallélisation : p-C/C/SPMS et p-C/C/MPSS. Après une présentation des résultats expérimentaux sur des données générées aléatoirement mais en s'inspirant de leur cas d'étude (Montreal Transit Authority), ils concluent sur l'équivalence d'utiliser SS1 ou SS2, et sur une efficacité ac-

centuée lorsque le nombre de processeurs augmente.

Enfin, comme dernier exemple nous pouvons aussi citer Xiang et al. [197]. Les auteurs se sont intéressés au DARP dynamique en partant d'un cas le plus général possible :

- une flotte hétérogène (tous les véhicules ne peuvent pas transporter toutes les personnes) basée sur un unique dépôt, des fenêtres de temps souples sur les demandes (avec un système de pénalité lors de violation),
- un temps maximum de trajet pour les chauffeurs mais qui peut être dépassé suivant les perturbations aléatoires,
- chaque fin de trajet, les conducteurs doivent prendre une pause,
- une durée de travail maximum par jour avec pénalité en cas d'excès,
- tous les conducteurs ne peuvent pas conduire tous les véhicules,
- le coût d'un trajet dépend de nombreux coûts : de kilométrage, de temps de conduite, d'attente, de temps de service, de temps de travail supplémentaire, et de temps de retard pour les clients.

La nature dynamique du problème est due à plusieurs événements possibles : nouvelle demande, temps de trajet non constant, temps stochastique de service à un site, suppression d'une demande, ou encore panne de véhicule. Une demande peut être rejetée s'il n'y a plus assez de ressources. Les auteurs définissent pour chaque type d'événement, une liste d'opérations à exécuter. Puis, une recherche locale, inspirée de Xiang et al. [196], est appliquée pour optimiser les routes. Pour présenter leurs résultats expérimentaux, de nombreuses simulations ont été réalisées. Ces simulations ont montré la stabilité du système d'ordonnanceur qui est assez robuste vis-à-vis d'événements comme l'annulation de demande ou encore la panne de véhicule.

Cependant, la grande différence entre le DARP général avec le problème de transports de patients est la capacité unitaire pour tous les véhicules. Autrement dit, lorsqu'une ambulance prend en charge une personne à son sommet d'origine, elle part directement à son sommet de destination. Cette spécificité rend possible la formulation de ce problème en un problème de multi-voyageurs de commerce avec fenêtres de temps et compétences. La partie suivante présente l'idée générale de cette formulation. De plus, il a déjà été démontré que certains cas particuliers de problèmes de transports peuvent se ramener à certains types de problème de voyageur de commerce (PVC).

6.2.2 Le problème du voyageur de commerce

Le problème de transports de patients peut être formalisé comme un problème de voyageur de commerce. L'idée générale est de représenter ce problème par un graphe orienté défini par un ensemble de sommets (un sommet par dépôt et par demande de transport) et un ensemble d'arcs entre chaque paire de sommets. Le poids d'un arcs entre un sommet d'une demande i et un sommet d'une demande j est égal à la durée de satisfaction de la demande i (durée du trajet du patient de la demande i plus le temps de prise en charge de ce patient) plus la durée du trajet du lieu de destination du patient i au lieu de départ du patient de la demande j. Une solution du problème revient à déterminer les circuits des véhicules tels que tous les sommets doivent être traversés exactement par un véhicule.

Nous pouvons facilement en déduire qu'il s'agit du problème multi-voyageurs de commerce avec des contraintes additionnelles : fenêtre de temps, plusieurs dépôts, temps de trajet maximal, et un voyageur ne peut pas passer par tous les sommets du graphe (prise en compte du type de véhicule).

La transformation de certains problèmes de transports en PVC n'est pas nouvelle. Gilbert Laporte [130] propose une méthode générale pour transformer certaines classes de problèmes de transports en un PVC simple. Les classes des problèmes concernées sont les suivantes :

- le problème du postier chinois (avec uniquement des arêtes, ou arcs, ou un graphe mixte),
- le même problème du postier chinois avec en plus des distances non symétriques,
- le problème dérivé du postier chinois : le postier rural dont le circuit à déterminer doit passer au moins par un ensemble d'arcs ou arêtes mais pas nécessairement par tous,
- le Stracker Crane Problem, cas particulier du postier rural, avec arcs uniquement et distances symétriques.

L'auteur présente la transformation de ces classes de problèmes en PVC en trois étapes :

- La première étape consiste à transformer le graphe d'origine en un premier graphe sans arête et uniquement avec des arcs (une arête est remplacée par une paire d'arcs dont l'un fera partie de la solution finale).
- La seconde étape consiste à construire un graphe complet à partir du premier graphe avec :
  - comme ensemble de sommets : l'ensemble des arcs par lesquels il faut obligatoirement passer une fois ou des paires d'arcs dues aux arêtes.
  - comme valeur de chaque arc entre deux sommets $a_{i,j}$ et $a_{k,l}$ (représentant les arcs (i,j) et (k,l) du graphe d'origine), le plus court chemin entre le sommet j et k du graphe d'origine.

  A la fin de cette étape, le problème de départ avec ce nouveau graphe a été transformé en un problème de voyageur de commerce généralisé, c'est-à-dire que le voyageur doit passer non pas par chaque sommet du graphe, mais une fois par chacun des ensembles de sommets : un ensemble pour chaque arc du graphe d'origine où l'on doit obligatoirement passer, et un ensemble constitué de chaque paire d'arcs dus aux arêtes.
- La dernière étape consiste à transformer ce PVC généralisé en simple PVC en utilisant les règles de l'article de Noon et Bean [153].

Comme le précise l'auteur, l'avantage de transformer ces problèmes en un unique problème connu est de pouvoir utiliser les méthodes exactes de résolution ou les méthodes approchées plus rapides et abondantes dans la littérature. Enfin l'auteur termine en présentant quelques résultats expérimentaux à partir de jeux de données générés aléatoirement. Ces résultats permettent de montrer l'efficacité de résoudre ces classes de problèmes de transports de véhicules par des algorithmes de résolution de PVC qui existent dans la littérature.

Les PVC ont beaucoup été étudiés dans la littérature (cf. le livre de Gutin et Abraham[93]). Ce type de problème avec en plus un nombre fixe de voyageurs est nommé m-PVC. C'est

une généralisation du PVC. Une étude de Tolga [188] expose différentes extensions de ce problème (fenêtres de temps, nombre non fixé de voyageurs, nombre maximal ou minimal de sommets à visiter, etc.), ses applications pratiques (ordonnancement d'impression de presses, itinéraires de bus, etc.), différentes formulations (programmation linéaire), et des heuristiques ou méthodes exactes pour la résolution. Dans notre problème de départ, les demandes de transports sont caractérisées par des fenêtres de temps. Or vérifier si un m-PVC avec fenêtre de temps est réalisable est NP-complet (cf. Savelsbergh [173]).

Dans un article de Mitrović-Minić et Krishnamurti [147], les auteurs cherchent à minimiser le nombre de véhicules dans un m-PVC avec fenêtre de temps. Ils présentent le calcul d'une borne inférieure et d'une borne supérieure du nombre de véhicules nécessaires. Ces bornes sont déterminées à partir de deux graphes de précédences. Ensuite, les auteurs présentent des instances de données pour montrer dans quels cas les bornes sont égales ou non. Enfin, ils concluent en montrant l'utilité de ces bornes pour le pré-processing de ce problème avant sa résolution.

Une autre étude sur un problème de multi-voyageurs de commerce avec fenêtre de temps est disponible dans un article de Wang et Regan [193]. Dans leur cas, les voyageurs sont des véhicules sans contrainte de capacité qui doivent partir de leurs dépôts d'origines mais ne sont pas obligés de retourner à ce même dépôt après leurs services. Les sommets représentent des points de chargements caractérisés par un temps de traitement. Tous les points ne doivent pas être nécessairement visités par les véhicules. La fonction objectif est de maximiser le nombre de points visités et de minimiser les coûts de déplacements des véhicules. Afin de résoudre ce problème, ils commencent par définir un modèle de PLNE. Puis, ils définissent deux notions de modèle sur-contraignant et sous-contraignant. Ces deux types de notions sont basés sur les contraintes de fenêtres de temps et les durées entre chaque point. Les auteurs décrivent leur technique de résolution itérative avec des contraintes de temps exprimées par des variables binaires. A chaque itération, deux problèmes sont résolus : l'un avec les contraintes sur-contraignantes, et l'autre avec les contraintes sous-contraignantes. Enfin, une technique de partition de fenêtre de temps est présentée afin que les coûts des solutions trouvées itérativement soient décroissants.

Malgré une littérature importante sur le PVC, il n'existe pas à notre connaissance d'études sur un problème qui serait très similaire au problème de transports de patients : un m-PVC avec fenêtre de temps, multi-dépôt, durées maximales de trajet pour chaque voyageur, et "multi-compétences". Ce dernier terme exprime la contrainte que tous les patients ne peuvent pas être transportés par tous les types de véhicules. Ou encore, chaque voyageur possède un ensemble de sommets qu'il peut visiter sachant que l'intersection entre chaque ensemble de sommets de chaque voyageur est non nulle, dans le cas contraire le problème se ramènerait à résoudre plusieurs PVC indépendamment.

6.2.3 Problèmes de transports dans le milieu hospitalier

Récemment, un chapitre écrit par Doerner et Hartl [59] est consacré aux problèmes de transports dans le milieu de la santé. Comme les auteurs le précisent, les problèmes

fondamentaux sont basés sur des problèmes de tournées de véhicules, de transports à la demande, d'emplacements de dépôts, et de zones de couverture d'urgence. Ils expliquent aussi pourquoi plusieurs contraintes du monde réel de l'hôpital peuvent enrichir certains problèmes de base de la littérature. Dans les problèmes de tournées de véhicules autres que les problèmes de transports de patients par ambulance, les auteurs présentent quelques problèmes liés à la logistique du transport de matériels médical ainsi que le ramassage et la livraison de sacs de sang. Une autre catégorie de problèmes de transports concerne les problèmes de zone de couverture d'urgence (Alsalloum et Rand[2], Araz et al. [6], Rajagopalan et al. [164]). Ces problèmes sont étudiés essentiellement en Amérique du Nord pour améliorer les zones des couvertures des soins d'urgences. Le but de ce problème est généralement d'augmenter le nombre d'habitants de la zone de couverture en minimisant le nombre de véhicules d'urgence utiles. Le temps de réponse à une urgence est un facteur important à prendre en compte dans la qualité de service de ce problème.

La catégorie des problèmes de transports dans le milieu de la santé qui nous intéresse, est celle des DARP. Melachrinoudis et al. [142] portent leur attention sur un organisme de santé aux Etats-Unis s'occupant des transports de personnes ne pouvant plus conduire et nécessitant un traitement médical les obligeant à se déplacer dans certaines unités de soins (exemple : problème de droguée, alcoolisme, etc.). La particularité du problème provient de la double demande de transports : chaque personne doit être amenée à un établissement de santé et ramenée à son lieu de départ après son soin par le même véhicule. Les auteurs proposent un PLNE pour modéliser ce problème avec deux critères à minimiser : le coût des transports et la qualité de transport pour chaque personne (combinaison linéaire entre le temps de transport supplémentaire à l'aller et au retour, le temps d'attente du véhicule après le service, le temps en avance à l'arrivée à l'unité de soin, et le temps en retard à l'arrivée à l'unité de soin). La fonction objectif est une combinaison linéaire des deux critères précédents. Les auteurs utilisent tout d'abord un solveur (LINGO) pour résoudre ce problème, mais étant donné la difficulté et le temps de résolution des instances du problème, ils proposent une recherche tabou classique. L'ensemble des solutions voisines de la solution courante est déterminé en supprimant le transport d'une personne d'un itinéraire, et en l'affectant à un autre.

Un autre cas d'étude d'un DARP dynamique, très proche de notre problème, a été abordé par Beaudry et al. [13]. Pour résoudre ce problème de transports de patients, les auteurs ont développé une heuristique. L'objectif est d'insérer des nouvelles demandes dans les routes existantes en respectant les contraintes telles que l'isolement du patient ou l'exigence d'objets médicaux pour le transport. Les auteurs présentent une heuristique basée sur un algorithme par insertions et une recherche tabou. Ils essayent de traiter ce problème de la manière la plus générique possible afin de pouvoir l'appliquer à d'autres cas. Ce problème est donc très similaire au notre. Mais contrairement à leur cas, les transports au CHRU ne s'effectuent pas en fauteuil roulant, mais uniquement sur civière, avec un seul patient par véhicule. De plus, les équipes ambulancières peuvent changer leur type de véhicule à tout moment (pour effectuer un transport médicalisé, ou après un transport contagieux). Enfin, parmi les événements qui peuvent se produire, les demandes du SAMU sont à prévoir et à ne pas négliger.

Suite à cette dernière étude, Hannes et al. [94] ont continué à travailler sur ce même problème avec une partie des auteurs de Beaudry et al. [13]. Ce travail a été mené en collaboration avec le centre du *département de transport des patients*. Ce département dirige également le transport des patients à l'intérieur d'un hôpital et entre les bâtiments en utilisant des véhicules (avec plusieurs patients par véhicule et des configurations de véhicules différentes) ou à pied (civières, lits ou fauteuils roulants). Les demandes ont approximativement les mêmes caractéristiques que dans l'étude précédente (fenêtres de temps, modes de transport, matériel requis, arrivé en temps réel, etc.). Un modèle de simulation à événements discrets est proposé de manière à reproduire l'environnement dynamique des transports à l'aide de données réelles et de tester leur système de planification : "Opti-TRANS". Ce système de planification des transports permet de réserver, d'ordonnancer, de dispatcher, de superviser et de tracer les demandes de transports. Plusieurs algorithmes d'optimisation ont été combinés : deux méthodes pour l'affectation des demandes, trois méthodes pour le routage et l'ordonnancement, et un algorithme évolutionnaire. Grâce à Opti-TRANS, les auteurs ont constaté une amélioration de la satisfaction des patients et une réduction du coût total des transports. Enfin, ils indiquent que ce système peut également être utilisé pour d'autres types de transport à la demande comme du matériel médical.

Une autre étude menée en Autriche par Kiechle et al. [124], présente une spécificité en commun avec notre cas, celle de manager des demandes de transports en urgence en même temps que des demandes de transports classiques et régulières. Leur problème fait intervenir deux activités en conflits : assurer les transports de patients réguliers et garder un certain niveau de couverture d'urgence de manière à pouvoir assurer des demandes de transports urgentes avec un faible temps de réponse. Le problème consiste donc à manager en temps réel une flotte d'ambulances pouvant transporter deux personnes à la fois. De manière à tester différentes stratégies de gestion de déplacement des véhicules, les auteurs ont implémenté une méthode d'optimisation rapide pour résoudre le problème d'affectation des demandes de transports régulières aux ambulances. Cette méthode s'appuie sur une méthode proposé par Jaw et al. [105] pour la résolution de DARP avec fenêtre de temps. Elle est appelée suite à deux événements possibles :

- Lorsqu'une demande urgente arrive, le véhicule vide le plus proche du lieu de la demande est envoyé, et les routes sont ré-optimisées avec une ambulance de moins.
- Lorsqu'un véhicule vient d'achever une demande urgente, elle est de nouveau disponible pour les transports réguliers, les routes sont ré-optimisées avec une ambulance de plus.

Quatre stratégies de déplacements des véhicules sont testées. Elles sont basées sur deux possibilités du point d'attente des ambulances entre deux demandes de transports régulières, soit l'ambulance attend au lieu d'arrivée du dernier patient transporté, puis part vers le lieu de départ du prochain patient de manière à être juste à l'heure. Soit l'ambulance part immédiatement après avoir déposé un patient au lieu de départ du prochain patient à transporter, et attend à cet endroit. Ces deux stratégies sont soit statiques (identiques pour toute la journée), soit dynamique (l'une des deux stratégies est choisie par défaut et peut changer en fonction du calcul d'une meilleure zone de couverture d'urgence). Après quelques expérimentations par des simulations, les résultats obtenus montrent une diminu-

tion du temps de réponse et une augmentation de la zone de couverture pour les stratégies dynamiques.

6.3 Conclusion

Dans cette deuxième partie de la thèse, le problème abordé, décomposable en deux sous problèmes, est lié aux transports de patients par véhicules. Le sous-problème majeur se situe au niveau de la Centrale des Ambulanciers. Il consiste à déterminer les meilleures affectations des transports de patients aux ambulances du CHRU ou aux ambulances privées. Le cas échéant, cette planification en temps réel de transports de patients est soumise aux contraintes particulières du monde hospitalier (désinfection, transport médicalisé, etc.). Le deuxième sous-problème, spécifique au CHRU de Tours, concerne la répartition du nombre d'ambulanciers au SAMU et à la Centrale des ambulanciers. D'une part le SAMU souhaiterait avoir un nombre suffisant d'ambulanciers de manière à répondre plus rapidement aux demandes urgentes et à moins désorganiser la CA par des demandes inopinées d'ambulanciers. D'autre part, la CA nécessite un nombre important d'ambulanciers de manière à répondre à toutes les demandes de transports en évitant de faire appel à des sociétés d'ambulances privées, mais aussi à répondre rapidement aux demandes d'ambulanciers émanant du SAMU.

Après une analyse de la littérature de problèmes voisins du problème dynamique de transports de patients, nous pouvons conclure qu'il n'existe pas à notre connaissance des travaux de recherche incluant ce problème de transports de patients. Même si de nombreuses études possèdent des caractéristiques similaires à notre problème, les méthodes de résolution proposées ne peuvent pas s'appliquer en l'état. L'originalité du problème provient des contraintes spécifiques au milieu hospitalier. Les spécificités du problème, le distinguant des autres problèmes abordés dans la littérature, sont les suivantes :

- Les demandes de transports ne sont pas toutes identiques, chacune d'elle se caractérise entre autre par un type d'ambulance à utiliser et une opération à effectuer après le transport (ramener un médecin, désinfecter le véhicule, changer de types de véhicule, ou aucune opération).
- Les équipes ambulancières peuvent changer plusieurs fois de type d'ambulance en fonction des demandes qu'elles assurent.
- Toutes les demandes ne sont pas nécessairement traitées par les ambulances du CHRU mais peuvent être assurées par des ambulances privés. Ce cas est à minimiser car il induit un coût non négligeable pour le CHRU.
- Les ambulances ne peuvent transporter qu'un unique patient à la fois.
- Un aspect dynamique et aléatoire est à prendre en compte, non seulement à cause des demandes de transports qui arrivent en temps réel mais aussi en raison des demandes d'ambulanciers inopinées du SAMU.

Dans ce chapitre, plusieurs similarités ont été exposées entre ce problème de transports de patients et les problèmes classiques de tournées de véhicules. L'un des plus semblables est le *Dial-A-Ride Problem* (DARP) dans le cas dynamique. Cependant, en considérant la capacité unitaire des véhicules, le problème se rapproche d'un type particulier du problème

de multi-voyageurs de commerce. Dans les deux cas, de nombreux algorithmes ont été proposés dans la littérature de manière à résoudre ces problèmes de tournées. Par conséquent, nous avons adapté certaines méthodes de résolution ayant fait leurs preuves, pour résoudre notre problème de transports de patients.

Chapitre 7

Optimisation des tournées

Dans ce chapitre, nous nous intéressons au problème d'optimisation des tournées des ambulances au sein de la Centrale des Ambulanciers. L'étude de ce problème est décomposée en deux parties. Dans chacune d'elles, une approche différente du problème est présentée. Dans la première partie, le problème est abordé dans sa version statique, de manière la plus générique possible. Dans la seconde partie, le problème est étudié en considérant l'ensemble des contraintes spécifiques à la Centrale des Ambulanciers (CA) et dans sa version dynamique. Pour chacune des approches, une modélisation du problème et des méthodes de résolution sont proposées et testées.

7.1 Modèle statique du problème des ambulanciers

Dans cette première étude nous avons ramené le problème d'optimisation de tournées d'ambulances à un problème proche du problème du multi-voyageurs de commerce. Nous présentons dans une première section la notation et la modélisation du problème, puis nous proposons deux méthodes de résolution. La première est basée sur la Programmation Linéaire en Nombre Entier (PLNE) en utilisant certaines techniques de pré-processing et de coupes (Kergosien et al. [111]). Nous avons également étendu ce PLNE à un problème de tournée de personnel de soin pour l'hospitalisation à domicile qui ne sera pas détaillé dans ce document ([117] et [114]). Et la deuxième est une heuristique : une recherche tabou avec mémoire adaptative (Kergosien et al. [112]).

7.1.1 Définition et modélisation

La première étude aborde le problème dans une version statique. Nous supposons que nous connaissons toutes les demandes de transports à l'avance. Ces demandes sont caractérisées par une heure de prise en charge du patient à son lieu d'origine qui est estimée en fonction de l'heure réelle de rendez-vous du patient au service de destination. Les heures de départ des équipes sont à déterminer mais une durée de travail maximale est à respecter. Nous considérons également que chaque équipe est affectée à un véhicule pour toute la journée. Pour cette première étude, nous ne nous intéressons pas en détail aux différents types

de transports. Cependant, nous considérons que tous les véhicules ne peuvent pas effectuer tous les transports. Cette contrainte permet d'introduire la notion de type de véhicule à utiliser pour un type de transport. Mais elle permet aussi de généraliser le problème en tenant compte par exemple des différents matériels médicaux requis pour certains transports. Etant donné les transports à effectuer dans une journée, l'objectif est de proposer les affectations des véhicules aux demandes et de définir les trajets des véhicules de manière à minimiser les coûts de transports (appel aux ambulances privées et frais kilométriques) et en s'assurant de ne pas faire attendre trop longtemps un patient. Ce dernier critère revient à minimiser le plus grand retard.

7.1.1.1 Notation

Soit $\mathcal{R}$ l'ensemble des n demandes de transports de la journée, chaque demande i est caractérisée par :

- Un lieu de départ dep_i du patient et son lieu de destination $dest_i$,
- Un temps $t_{dep_i,dest_i}$ de déplacement du véhicule entre les points de départ dep_i et de destination $dest_i$,
- Un temps t_{dest_i,dep_i} de déplacement du véhicule entre les points de destination $dest_i$ et de départ dep_i,
- Un temps p_i de prise en charge du patient par les ambulanciers pour effectuer le transport en dehors du véhicule (temps pour aller chercher le patient dans le service origine et l'amener au véhicule, et le temps de l'évacuer du véhicule pour l'amener au service de destination), ce temps de prise en charge vient s'additionner au temps de transport.
- Une date e_i de rendez-vous pour le départ du patient de la demande i. Le patient ne peut pas être pris en charge par les ambulanciers avant cette date et doit attendre le moins possible l'ambulance qui va effectuer son transport.

Soit $\mathcal{V}$ l'ensemble des m véhicules (ambulances du CHRU et ambulances du privé), chaque véhicule v est caractérisé par :

- Un dépôt D_v, on considère qu'un véhicule n'effectue qu'une seule tournée, qu'il quitte son dépôt en début de tournée et n'y revient qu'en fin de tournée. Nous notons également $\mathcal{D}$ l'ensemble des dépôts.
- Une durée maximale T_v d'utilisation du véhicule k avant de revenir au dépôt. Cette durée permet de représenter des contraintes liées à la durée de travail des ambulanciers ou à la limitation du carburant.
- Un coût $c^v_{a,b}$ engendré par l'utilisation du véhicule v pour effectuer le trajet du point a au point b. La prise en compte du véhicule dans les coûts se justifie par le fait que les ambulances privées sont plus coûteuses que les ambulances de la Centrale des Ambulanciers. De plus, un coût fixe de mobilisation par véhicule pourra être ajouté à chaque sortie de chaque dépôt.

Chaque patient ne peut pas être transporté par n'importe quel véhicule. Les véhicules présentent des caractéristiques diverses requises pour transporter tel ou tel type de patient. Nous affectons à chaque véhicule v et à chaque demande i un vecteur binaire S_v et H_i.

Chaque attribut $s_{v,u}$ de S_v est égal à 1 si le véhicule v possède la caractéristique u et 0 sinon. Et chaque attribut $h_{i,u}$ de H_i est égal à 1 si la demande i nécessite la caractéristique u pour le transport et 0 sinon.

7.1.1.2 Modélisation

Le problème consiste à répondre à toutes les demandes de transports en respectant les contraintes et en minimisant deux critères qui sont le coût total de déplacements de tous les véhicules mobilisés et le temps d'attente maximum des patients avant leur prise en charge. Ce problème est équivalent à un PVC dans un graphe G orienté asymétrique et fortement connexe. Ce graphe est constitué d'un ensemble de sommets divisé en deux sous-ensembles : un sous-ensemble $\mathcal{D}$ de sommets pour tous les dépôts des véhicules, et un sous-ensemble $\mathcal{R}$ de sommets pour toutes les demandes de transports. Un arc entre deux sommets $(i,j) \in \mathcal{R}\times\mathcal{R}$ symbolise le traitement de la demande i et le passage à la demande j comme le montre la figure 7.1. L'arc possède donc :

- Une longueur $d_{i,j}$ égale à $t_{dep_i,dest_i} + p_i + t_{dest_i,dep_j}$.
- Un coût $w^v_{i,j}$ égal à $c^v_{dep_i,dest_i} + c^v_{dest_i,dep_j}$.

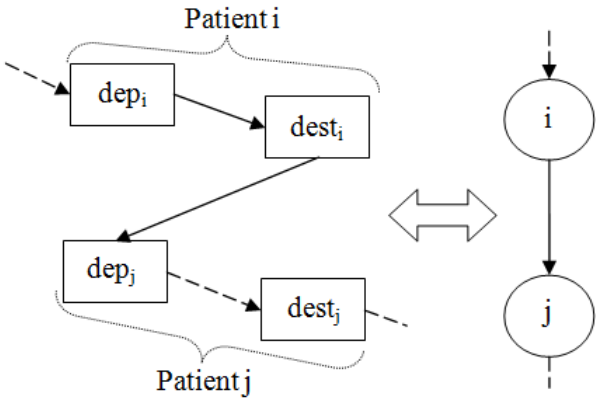


FIG. 7.1 – Modélisation en PVC

Pour les arcs partant d'un sommet dépôt à un sommet représentant une demande, la longueur est simplement égale à la durée pour aller du dépôt au lieu de départ du patient, le coût est égal au coût normal plus un coût fixe de mobilisation. Les arcs de retour au dépôt ont une longueur égale à la durée pour aller du lieu de destination du dernier patient transporté au dépôt.

Les véhicules sont les voyageurs du PVC, ils ont une durée maximale de voyage T_v, temps d'attente compris. Tous les voyageurs ne peuvent pas passer par tous les sommets (respect des spécificités des types de véhicules et matériels) et chaque sommet i ne peut être traversé par un voyageur qu'à partir de la date e_i. Il y a un seul dépôt par voyageur, et tous les voyageurs ne sont pas obligés de sortir de leur dépôt. Certaines ambulances privées peuvent ne pas être utilisées.

L'objectif de ce PVC est de trouver les itinéraires de chaque voyageur de manière que chaque sommet soit traversé par exactement un seul voyageur tout en respectant les contraintes. Les deux critères à minimiser sont les coûts totaux des trajets des voyageurs et le plus grand retard des voyageurs à chaque sommet. Ce problème multicritère prend en compte aussi bien les coûts de transports pour l'hôpital que la qualité des transports en considérant les retards. L'optimisation multicritère est difficile car il n'existe pas en général de solutions minimisant tous les critères simultanément. Il existe néanmoins plusieurs méthodes pour aborder ce type de problèmes (Steuer, 1986 [183]). La méthode que nous avons choisie est l'approche "epsilon-contrainte" qui consiste à borner un critère par une valeur ϵ et à minimiser l'autre critère. Ici, nous bornerons le critère du retard maximal. Ceci revient à attribuer des fenêtres de temps $[e_i, e_i + \epsilon]$ pour chaque sommet i, de sorte que chaque voyageur doit traverser les sommets à une date comprise entre ces deux valeurs. Toute solution respectant ces fenêtres de temps garantit au patient de ne jamais attendre l'ambulance plus d'un temps ϵ.

7.1.2 Résolution exacte (PLNE)

L'une des premières modélisations en PLNE pour le PVC a été formulée par Miller et al. en 1960 [144]. Cette formulation a été étendue par Svetska et Huckfeldt en 1973 [184] à plusieurs voyageurs. Les auteurs proposent une procédure par évaluation et séparation pour résoudre ce problème en utilisant une relaxation du programme linéaire. Dans l'article de Kara et Bektas (2006) [109], les auteurs proposent d'étendre ces modèles en intégrant un nombre minimum de sommets à visiter pour chaque voyageur aussi bien dans le cas mono que multi-dépôts. Nous nous sommes inspirés de ces modèles pour établir un PLNE du problème de transports de patients.

7.1.2.1 Les variables

Etant donnés $\mathcal{R}$ un ensemble de demandes, $\mathcal{D}$ un ensemble de dépôts et $\mathcal{V}$ un ensemble de véhicules, les variables du modèle sont les suivantes (nous considérons un dépôt D_v par véhicule v) :

- $\forall (i,j) \in (\mathcal{R} \cup \mathcal{D})^2, i \neq j, \forall v \in \mathcal{V} : x_{i,j}^v = \begin{cases} 1 & \text{si le véhicule } v \text{ passe par l'arc } (i,j) \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$
- $\forall i \in \mathcal{R} : u_i \in \{1...n_{max}\}$: cette variable permet d'éliminer les sous-tours d'un même véhicule, la valeur est au moins égale au nombre de sommets, appartenant à $\mathcal{R}$ visités par le véhicule depuis le sommet dépôt sachant que n_{max} est le nombre maximal de sommets qu'un même véhicule peut visiter. Cette valeur est déterminée par un pré-processing des données que nous détaillerons plus loin.
- $\forall i \in \mathcal{R} : z_i \geq 0$: date de départ du sommet i.

7.1.2.2 Les contraintes

Les contraintes du modèle sont les suivantes :

$$\forall v \in \mathcal{V} : \quad \sum_{i \in \mathcal{R}} x^v_{D_v,i} \leq 1 \tag{7.1}$$

$$\forall i \in \mathcal{R} : \quad \sum_{v \in \mathcal{V}} x^v_{D_v,i} + \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{j \in \mathcal{R}} x^v_{j,i} = 1 \tag{7.2}$$

$$\forall i \in \mathcal{R}, \forall v \in \mathcal{V} : \quad x^v_{D_v,i} + \sum_{j \in \mathcal{R}} x^v_{j,i} = x^v_{i,D_v} + \sum_{j \in \mathcal{R}} x^v_{i,j} \tag{7.3}$$

$$\forall (i,j) \in R^2, i \neq j : \quad u_i - u_j + n_{max}. \sum_{v \in \mathcal{V}} x^v_{i,j} \leq n_{max} - 1 \tag{7.4}$$

$$\forall i \in \mathcal{R} : \quad e_i \leq z_i \tag{7.5}$$

$$\forall i \in \mathcal{R} : \quad z_i - e_i \leq \epsilon \tag{7.6}$$

$$\forall i \in \mathcal{R}, \forall v \in \mathcal{V} : \quad d_{D_v,i}.x^v_{D_v,i} \leq z_i \tag{7.7}$$

$$\forall (i,j) \in \mathcal{R}^2, i \neq j : \quad z_i + d_{i,j} \leq z_j + (1 - \sum_{v \in \mathcal{V}} x^v_{i,j}).HV \tag{7.8}$$

$$\forall (i,j) \in \mathcal{R}^2, i \neq j, \forall v \in \mathcal{V} : \quad z_i + d_{i,D_v} - z_j + d_{D_v,j} - T_v \leq (2 - x^v_{i,D_v} - x^v_{D_v,j}).HV \tag{7.9}$$

Les contraintes 7.1 imposent au plus une seule sortie d'un véhicule de son dépôt. Les contraintes 7.2 expriment le fait que tous les sommets i doivent être traversés exactement une fois, autrement dit que chaque patient doit être transporté. Les contraintes 7.3 assurent la continuité des circuits : lorsqu'un véhicule v entre dans un sommet i, il en ressort obligatoirement. Les contraintes 7.4 sont aussi appelées *SEC* dans la littérature pour *Substours Elimination Constraints*. Elles permettent d'éliminer les sous-tours d'un véhicule (sous-circuits) en imposant un ordre croissant strict sur les variables u_i dans l'ordre des sommets visités par un même véhicule. Si deux sommets i et j sont visités dans cet ordre par un même véhicule alors u_i est strictement plus petit que u_j, il est ainsi impossible de créer un circuit ne passant pas par le dépôt du véhicule [144]. Même si les contraintes *SEC* ne sont pas indispensables, car les contraintes 7.8 permettent aussi l'élimination des sous-tours, nous les utilisons comme une technique de coupe expliquée plus loin dans cette section. Les contraintes 7.5 et 7.6 bornent la valeur de z_i pour chaque sommet i de telle manière que la date de départ du véhicule soit comprise entre e_i et $e_i + \epsilon$. Les contraintes 7.7 (spécifiques au dépôt) et 7.8 expriment les temps de trajets entre deux sommets (HV est une constante positive supposée infini). Entre deux sommets consécutifs i et j visités par un même véhicule, la date de départ z_j ne peut pas être inférieure à $z_i + d_{i,j}$. Enfin, les dernières contraintes 7.9 imposent à chaque véhicule v de ne pas dépasser son temps de trajet maximal T_v.

Pour garantir le respect des contraintes de caractéristiques des véhicules à ne pouvoir desservir que certaines demandes, il suffit pour chaque véhicule v qui ne peut pas assurer la demande i de fixer certaines variables à 0 :

$$\forall i \in \mathcal{R} \cup \mathcal{D} : x^v_{i,j} = x^v_{j,i} = 0$$

Enfin, le dernier élément concerne le calcul de n_{max} qui permet de mieux borner la valeur des u_i et d'utiliser cette valeur pour certaines coupes. Ce calcul est basé sur des graphes G_v représentant la succession des demandes possibles par véhicule v. Un graphe G_v est donc construit pour chaque véhicule v de la manière suivante :

- un sommet pour chaque demande que peut assurer le véhicule
- un arc entre un sommet d'une demande i à un sommet d'une demande j si $e_i + d_{i,j} \leq e_j + \epsilon$ (le véhicule peut réaliser successivement ces deux demandes) et avec une distance égale à $max(d_{i,j}, e_j - e_i - \epsilon)$ (temps minimum pour réaliser i puis j).

Les sommets sont ensuite triés par rang croissant de sorte qu'aucun sommet de rang r ne possède d'arc vers un sommet d'un rang inférieur ou égal à r. Pour le calcul de n_{max} par véhicule ($n_{max,v}$), nous appliquons les étapes suivantes :

- construire un tableau de valeurs contenant chaque distance minimale entre un sommet de rang r et de rang $r+1$, la taille de ce tableau est égale au nombre de rangs moins un,
- trier ce tableau par ordre croissant des valeurs des distances minimales entre chaque rang,
- déterminer le $n_{max,v}$ tel que la somme des $n_{max,v} - 1$ premières valeurs du tableau soit inférieure ou égale à $T_v - d_{i,D_v} - d_{D_v,j}$, et la somme des $n_{max,v}$ premières valeurs soit supérieure à $T_v - d_{i,D_v} - d_{D_v,j}$ avec $d_{D_v,j}$ la plus petite distance entre le dépôt D_v et tous les sommets j du graphe, et d_{i,D_v} la plus petite distance entre tous les sommets i du graphe et le dépôt D_v. Le nombre $n_{max,v}$ est une borne supérieure du nombre de demandes que peut assurer le véhicule v.
- calculer n_{max} tel que $n_{max} = max_{v \in \mathcal{V}}(n_{max,v})$.

Ce calcul ne permet pas de trouver la valeur optimale de n_{max} mais une bonne borne supérieure en un temps raisonnable.

7.1.2.3 La fonction objectif

Les retards étant bornés, seuls les coûts de transports sont à prendre en compte, la fonction à minimiser est donc la suivante :

$$\sum_{\forall v \in \mathcal{V}} \sum_{\forall i \in \mathcal{R} \cup \mathcal{D}} \sum_{\forall j \in \mathcal{R} \cup \mathcal{D} \setminus i} w^v_{i,j}.x^v_{i,j} \tag{7.10}$$

7.1.2.4 Le pré-processing

Quelques traitements rapides des données en amont de la résolution du problème permettent de fixer certaines variables du modèle. Ces traitements sont les suivants :

- si deux sommets sont trop éloignés en termes de distance et que leurs fenêtres de temps sont trop proches, ils ne peuvent pas être assurés consécutivement par un même véhicule, ou encore si :

$$\forall (i,j) \in \mathcal{R}^2, i \neq j : e_j + \epsilon < e_i + d_{i,j} \; alors \; \forall v \in \mathcal{V} : x^v_{i,j} = 0$$

7.1.2.5 Les coupes

Nous avons ajouté des coupes au modèle de manière à réduire l'espace des solutions. Une première coupe permet de réduire l'intervalle des u_i en fonction des départs des véhicules des dépôts, si le véhicule arrivant au sommet i ne provient pas de son dépôt alors la valeur de u_i est supérieure ou égale à 2 :

$$\forall i \in \mathcal{R} : u_i + \sum_{v \in \mathcal{V}} x^v_{D_v,i} \geq 2 \tag{7.11}$$

De plus, certains sommets ne peuvent pas être traités par le même véhicule. Deux sommets ayant des fenêtres de temps trop éloignées ou au contraire trop proches nécessitent deux véhicules différents.
$\forall (i,j) \in \mathcal{R}^2, i \neq j : \quad Si\ \exists\ v \in \mathcal{V}\ tel\ que\ :$

$$d_{D_v,i} + max(d_{i,j}; e_j - e_i - \epsilon) + d_{j,D_v} > T_v \quad ou \quad (e_j + \epsilon < e_i + d_{i,j}) \wedge (e_i + \epsilon < e_j + d_{j,i})$$

$$Alors \quad \sum_{l \in \mathcal{R} \cup \mathcal{D} \setminus i} x^v_{l,i} + \sum_{l \in \mathcal{R} \cup \mathcal{D} \setminus j} x^v_{l,j} \leq 1 \tag{7.12}$$

Ces deux coupes 7.11 et 7.12 sont dites "légères". Enfin, deux dernières coupes peuvent être déduites des graphes G_v. Le véhicule v ne peut pas visiter plus de $n_{max,v}$ sommets :

$$\forall v \in \mathcal{V} : \sum_{(i,j) \in G_v} x^v_{i,j} < n_{max,v} \tag{7.13}$$

La dernière coupe s'appuie sur un calcul de plus longs chemins entre les sommets des graphes G_v. Etant donnés deux sommets i et j et un entier p, soit $A_{i,j,v,p}$ le plus long chemin reliant i à j passant par au plus p sommets. Si la durée de parcours de ce chemin est supérieure à $T_v - d_{D_v,i} - d_{j,D_v}$ alors le véhicule v ne peut pas sortir de son dépôt, suivre ce chemin et revenir à son dépôt. Il y a donc au moins un arc de ce chemin qui ne sera pas emprunté par le véhicule. Cela peut être traduit par la contrainte 7.14 :

$$\forall (i,j) \in \mathcal{R}^2, i \neq j, v \in \mathcal{V} : \sum_{(l,m) \in A_{i,j,v,p}} x^v_{l,m} < |A_{i,j,v,p}| \tag{7.14}$$

Le calcul des plus longs chemins pour les diverses valeurs de p s'effectue par une adaptation de l'algorithme de Floyd [75] utilisé habituellement pour calculer le plus court chemin.

Les résultats du PLNE ainsi que les performances de ces coupes sont présentés dans la section 7.1.4. Ces résultats serviront de comparaison à ceux donnés par la méthode tabou présenté ci-après.

7.1.3 Recherche tabou avec mémoire adaptative dans le cas statique

Il existe de nombreuses méthodes de résolution de problèmes de tournées, proposées dans la littérature. Nous avons décidé de choisir parmi les méthodes les plus performantes, celle qui s'adapterait au mieux à notre problème. La méthode finalement utilisée est basée sur celle décrite dans l'article de Taillard et al. [185]. Le problème considéré est un problème statique de tournées de véhicules avec fenêtres de temps souples (*Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows*, noté VRP-STW) : étant donné un ensemble de clients à servir et un ensemble de véhicules localisés à un unique dépôt, l'objectif du problème est de déterminer les routes de chaque véhicule de manière à satisfaire les demandes et à minimiser la distance totale des trajets et une somme pondérée de pénalités de retard. Le problème étudié dans cet article possède des points communs avec notre problème : plusieurs véhicules, des demandes à satisfaire caractérisées par des fenêtres de temps, un temps de service à chaque demande et une fenêtre de temps au dépôt précisant l'heure de début et de fin de tournée pour chaque véhicule. De plus, cette méthode a été reprise par les mêmes auteurs (Gendreau et al. [82]) pour résoudre ce même problème dans sa version dynamique (toutes les demandes ne sont pas connues à l'avance). Cependant, d'autres points diffèrent avec notre problème qui présente plusieurs dépôts, des fenêtres de temps rigides, pas de biens à livrer, une adéquation à respecter entre le patient et le véhicule et une fonction objectif différente.

La méthode est basée sur une recherche tabou avec une mémoire adaptative. Nous allons décrire dans cette section l'adaptation que nous avons réalisée pour le problème de transports de patients, de la méthode décrite dans [185] par Taillard et al.

7.1.3.1 Structure générale

L'algorithme 4, nommé $TSAM_{static}$, présente les grandes étapes de la méthode de résolution du problème. Sachant qu'une solution est un ensemble de routes disjointes, l'idée principale de l'algorithme est la suivante. Une liste de routes réalisables est stockée dans une mémoire adaptative. Une route représente la tournée d'une ambulance. Ces routes proviennent des meilleures solutions précédemment explorées. La première étape consiste à initialiser cette mémoire par des routes provenant de solutions initiales aléatoires. Pendant J itérations, des solutions sont construites à partir de cette mémoire adaptative, sont ensuite améliorées et sont ajoutées à la mémoire adaptative. L'amélioration des solutions consiste à réaliser, pendant I itérations, les opérations suivantes : décomposer l'ensemble des routes d'une solution en deux sous-ensembles, améliorer chaque sous-ensemble indépendamment à l'aide d'une recherche tabou et réunifier les sous-ensembles de manière à obtenir une nouvelle solution. Cette décomposition permet d'obtenir un gain en temps de résolution puisque la recherche tabou ne travaille pas sur toutes les routes à la fois (le voisinage d'une solution est donc moins important). A la fin de l'algorithme, une post-optimisation sur la meilleure solution trouvée est appliquée. Nous allons détailler chaque étape et opération importante de l'algorithme général.

Algorithme 4 $TSAM_{static}$

1: Initialisation de la mémoire adaptative
2: **Pour** $j = 1$ à J **faire**
3: $S \leftarrow$ solution construite à partir des routes de la mémoire adaptative
4: **Pour** $i = 1$ à I **faire**
5: *Décomposition* : création de deux sous-ensembles de routes S_1 et S_2 à partir de S
6: Appliquer la recherche tabou sur S_1 pour obtenir S'_1
7: Appliquer la recherche tabou sur S_2 pour obtenir S'_2
8: *Reconstruction* : rassembler S'_1 et S'_2 pour créer une nouvelle solution S'
9: $S \leftarrow S'$
10: **Fin pour**
11: Ajouter les routes de S à la mémoire adaptative
12: **Fin pour**
13: Post optimisation sur la meilleure solution trouvée

7.1.3.2 La mémoire adaptative

La mémoire adaptative est un ensemble de routes réalisables triées par ordre décroissant de qualité. La qualité d'une route est définie par la valeur de la fonction objectif de la solution dont elle provient. Deux actions importantes dans l'algorithme général font intervenir la mémoire adaptative : ajouter des nouvelles routes d'une solution et construire une solution à partir des routes de la mémoire.

La mémoire contient toujours le même nombre de routes, toutes différentes, provenant des meilleures solutions explorées durant la recherche. Quand de nouvelles routes sont ajoutées, les plus mauvaises sont supprimées. Chaque nouvelle route est insérée à la bonne place dans la mémoire adaptative en fonction de sa qualité. Si une route qui doit être ajoutée, est déjà présente dans la mémoire alors :

- soit elle améliore la qualité de celle présente dans la mémoire et elle est alors déplacée à la bonne place vers le début de la liste en fonction de sa nouvelle qualité,
- soit elle n'améliore pas la qualité de celle présente dans la mémoire et elle n'est donc pas ajoutée.

La construction d'une nouvelle solution à partir de la mémoire adaptative se déroule selon les étapes suivantes :

- Une probabilité commune et fixe de sélection, notée ρ, est associée à chaque route.
- Les routes sont considérées dans leur ordre dans la mémoire et une route est sélectionnée si un nombre généré aléatoirement est plus grand que ρ.
- Après la sélection d'une route, les autres routes de la mémoire adaptative qui ont au moins une demande en commun avec la route sélectionnée ou qui sont affectées au même véhicule, sont éliminées pour la prochaine sélection.
- Si l'ensemble des routes candidates est vide et qu'il reste des demandes non satisfaites, elles sont insérées dans les routes sélectionnées de la même manière que la procédure d'initialisation des solutions décrites ci-après.

7.1.3.3 Procédure d'initialisation

Cette procédure est utilisée pour construire Nb_{init} solutions initiales différentes. L'initialisation est décomposée en deux grandes étapes :

- Les véhicules sont triés dans une liste dans l'ordre croissant des coûts d'utilisation (les véhicules du CHRU avant les véhicules du privé).
- Les demandes sont traitées dans un ordre arbitraire ; une demande est affectée au premier véhicule de la liste pouvant réaliser la demande à l'heure en respectant toutes les contraintes.

Cette procédure permet la génération d'un nombre varié de routes. Après chaque construction d'une solution, une recherche tabou (décrite ci-après) est appliquée avec un petit nombre d'itérations. Les routes de chaque solution améliorée par la recherche tabou sont ensuite ajoutées à la mémoire adaptative.

7.1.3.4 Diversification

Durant la recherche, une même solution peut être explorée plusieurs fois (entre les lignes 4 et 10). Pour éviter cette redondance, une opération de diversification a été ajoutée à la ligne 3 pour explorer d'autres parties de l'espace des solutions encore pas ou peu explorées. Quand la meilleure solution a été générée plus de trois fois durant les I itérations, l'ordre de sélection des routes dans la mémoire adaptative est inversé en commençant donc par les routes de moins bonne qualité.

7.1.3.5 Décomposition et reconstruction des solutions

A chaque itération i, une recherche tabou est utilisée pour améliorer la solution courante S. La recherche tabou ne travaille pas sur toutes les routes d'une solution, mais seulement sur un sous-ensemble de routes de manière à diminuer le temps de résolution. L'ensemble des routes S est divisé en deux sous-ensembles disjoints notés S_1 et S_2. Cette décomposition est réalisée en alternant deux approches différentes : une approche géographique et une approche temporelle. L'approche géographique est basée sur la comparaison des centres de gravité des routes en fonction des points desservis par celles-ci. Alors que l'approche temporelle s'appuie sur les heures des transports des patients des routes. A chaque itération i (ligne 4), la route correspondante au $(i \ mod(m))^{\text{ième}}$ véhicule est sélectionnée. Puis les $m/2$ routes les plus similaires selon l'approche choisie (géographique ou temporelle) sont rassemblées pour former l'ensemble S_1. L'ensemble S_2 est constitué des routes restantes. Après la décomposition, une recherche tabou est exécutée sur chaque sous-ensemble de routes.

La reconstruction de la solution courante consiste simplement à réaliser l'union des deux sous-ensembles des routes améliorées par la recherche tabou.

7.1.3.6 Post optimisation

A la fin de l'algorithme (ligne 13), une post optimisation est appliquée sur la meilleure solution trouvée. Cette opération utilise le même processus qu'à l'initialisation : appliquer la recherche tabou avec un faible nombre d'itérations. Cette optimisation, similaire à l'utilisation d'une recherche locale, est souvent efficace pour améliorer la solution car la recherche tabou travaille sur toutes les routes simultanément et non sur deux sous-ensembles de routes.

7.1.3.7 Recherche tabou

L'algorithme tabou que nous avons utilisé est classique (Glover 1986 [88] et Hansen 1986 [95]) et possède la même structure que dans l'article de Taillard et al. [185]. La recherche tabou est exécutée deux fois par itération i sur deux sous-ensembles de routes. L'algorithme 5 décrit la structure de la recherche tabou implémentée.

Algorithme 5 Méthode tabou

1: **Tant que** le critère d'arrêt n'est pas atteint **faire**
2: Générer le voisinage de la solution courante en appliquant l'opérateur *"CROSS exchange"*
3: Sélectionner la meilleure solution, non tabou, dans l'ensemble des solutions voisines
4: **Si** la solution est meilleure que la meilleure solution connue **alors**
5: Sauver cette solution en tant que meilleure solution connue
6: **Fin si**
7: Mettre à jour la liste tabou
8: **Fin Tant que**

Le critère d'arrêt de la recherche tabou est un nombre fixe d'itérations défini par la relation suivante :

$$A \times \left(1 + \frac{i-1}{B}\right)$$

A et B sont deux paramètres, et i est l'itération courante des phases de décomposition et reconstruction des ensembles des routes d'une solution (lignes 4 à 10 de l'algorithme $TSAM_{static}$). Le critère d'arrêt dépend de ce numéro d'itération car à chaque exécution de la recherche tabou la qualité des solutions initiales est améliorée. Ainsi la recherche tabou nécessite plus de temps pour s'échapper d'un éventuel optimum local.

Le voisinage de la solution courante est déterminé en utilisant l'opérateur *CROSS exchange*. Comme le citent les auteurs de [185], cet opérateur est particulièrement bien adapté pour des problèmes de tournées de véhicules avec fenêtres de temps, cependant il nécessite une adaptation pour notre problème (tous les véhicules ne peuvent pas transporter tous les patients). Cet opérateur est aussi une généralisation d'opérateurs connus sous les noms de *2-opt* ou *Or-opt*. Il consiste à échanger deux sous-segments entre deux routes comme le présente la figure 7.2.

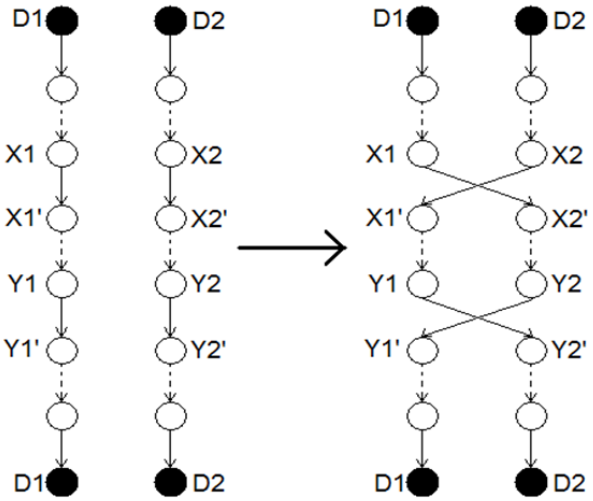


FIG. 7.2 – CROSS exchange

Sur la figure 7.2, $X1'$ est le successeur direct de $X1$, $X2'$ de $X2$, $Y1'$ de $Y1$ et $Y2'$ de $Y2$. L'algorithme 6 décrit la méthode générale utilisée pour calculer l'ensemble des solutions du voisinage entre deux routes uniquement. Les segments $[X1';Y1]$ et $[X2';Y2]$ ne contiennent pas forcément le même nombre de sommets.

L'opération la plus coûteuse en temps dans un algorithme de recherche tabou classique est l'énumération exhaustive de toutes les solutions du voisinage. Nous utilisons une condition nécessaire pour éviter d'énumérer des solutions non réalisables dans le voisinage.

Condition 1 :

$$(e_{X2'} + \epsilon \geq e_{X1} + d_{X1,X2'}) \ \wedge \ (e_{X1'} + \epsilon \geq e_{X2} + d_{X2,X1'}) \ \wedge \ (e_{Y2'} + \epsilon \geq e_{Y1} + d_{Y1,Y2'})$$

$$\wedge \ (e_{Y1'} + \epsilon \geq e_{Y2} + d_{Y2,Y1'})$$

Cette condition vérifie si le véhicule 1 a assez de temps pour traiter la demande correspondant au sommet $X1$ puis la demande du sommet $X2'$, mais aussi pour traiter la demande correspondant au sommet $Y2$ puis la demande du sommet $Y1'$. Cette condition effectue la même vérification pour le véhicule 2 (du sommet $X2$ à $X1'$, et du sommet $Y1$ à $Y2'$ respectivement). Etant donné que les fenêtres de temps de notre problème sont de largeur étroites et constantes, cette condition permet d'éviter d'énumérer un grand nombre de solutions non réalisables.

De plus, la valeur de la fonction objectif d'une solution du voisinage peut être calculée sans créer réellement la solution (échanger les sous-segments). Pour améliorer le temps d'énumération des solutions du voisinage, seules les solutions améliorant la meilleure solution du voisinage sont construites. L'évaluation d'un mouvement est calculée de la manière

Algorithme 6 CROSS exchange

```
1: Pour tous les sous-segments [X1', Y1] de la route du véhicule 1 faire
2:   Si [X1', Y1] contient seulement des transports que peut assurer le véhicule 2 alors
3:     Pour tous les sous-segments [X2', Y2] de la route du véhicule 2 faire
4:       Si [X2', Y2] contient seulement des transports que peut assurer le véhicule 1 alors
5:         Si la condition 1 est validée et l'échange améliore la meilleure solution connue dans le voisinage alors
6:           Echanger les deux sous-segments entre les deux routes
7:           Si la nouvelle solution est réalisable alors
8:             Sauver cette solution en tant que meilleure solution connue dans le voisinage
9:           Fin si
10:        Fin si
11:      Fin si
12:    Fin pour
13:  Fin si
14: Fin pour
```

suivante :

$$f(S') = f(S) - \sum_{x=X1}^{Y1} w^1_{x,succ(x)} - \sum_{x=X2}^{Y2} w^2_{x,succ(x)} + \sum_{x=X1'}^{pred(Y1)} w^2_{x,succ(x)} + \sum_{x=X2'}^{pred(Y2)} w^1_{x,succ(x)}$$

$$+w^1_{X1,X2'} + w^2_{X2,X1'} + w^1_{Y2,Y1'} + w^2_{Y1,Y2'}$$

Où $succ(x)$ et $pred(x)$ désignent respectivement les sommets successeur et prédécesseur du sommet x avant échange, $f(S)$ la valeur de la fonction objectif de la solution S, et $f(S')$ la valeur de la solution voisine.

Ces conditions permettent de réduire considérablement l'ensemble de solutions voisines générées entre deux routes. Pourtant, une solution obtenue après un mouvement et respectant toutes ces conditions n'est pas nécessairement réalisable à cause des fenêtres de temps des demandes. De plus, chaque véhicule possède un temps maximal de trajet qui implique de vérifier si les deux nouvelles routes sont réalisables ou non.

La liste tabou est aussi reprise de l'article de Taillard et al. [185]. Elle est basée sur la valeur de la fonction objectif d'une solution qui est stockée durant un nombre fixe d'itérations égal à la moitié du nombre maximal d'itérations de la recherche tabou. Une solution est tabou si sa valeur de fonction objectif est contenue dans la liste tabou. La taille de la liste tabou est supposée suffisamment grande pour être considérée de taille infinie. Contrairement aux recherches tabou classiques, la liste tabou n'est pas basée sur la représentation d'une solution ou le mouvement pour l'obtenir, car la probabilité pour obtenir deux différentes solutions avec la même valeur de fonction objectif est faible. Cette faible probabilité

s'explique par le grand nombre de valeurs différentes prises par les $w_{i,j}^k$ du fait qu'ils dépendent des frais kilométriques et des types de véhicules.

7.1.4 Résultats expérimentaux

Avant de tester les deux premiers algorithmes de la version statique du problème, nous avons généré aléatoirement des instances respectant les hypothèses de départ (cf. section 7.1.1) et dont les caractéristiques sont inspirées de l'activité réelle de la Centrale des Ambulanciers. Le langage utilisé pour l'implémentation est le C++. L'ordinateur utilisé est un Pentium(R) 4 CPU 3.00 GHz, 1.00 Go de RAM et le solveur utilisé pour le PLNE est CPLEX version 10.

7.1.4.1 Génération d'instances

Les jeux de données générés pour les tests possédent les caractéristiques communes suivantes :

- La période est d'une journée, durant laquelle les m ambulances ne peuvent pas rouler plus de 6 à 8 heures.
- Les m_{pub} ambulances publiques (appartenant à la Centrale des Ambulanciers) partent d'un même dépôt, Trousseau, alors que les m_{priv} ambulances privées sont réparties géographiquement (1 à 3 ambulances privées peuvent être regroupées par dépôt), sachant que les ambulances privées coûtent plus cher que les ambulances publiques (un coût fixe d'immobilisation par sortie de dépôt en plus du coût kilométrique).
- Le nombre de caractéristiques a été fixé à 3. Chaque caractéristique a une probabilité de 0,7 d'être présente dans un véhicule donné, qu'il soit du CHRU ou d'une société privée. Chaque véhicule possède donc de 0 à 3 caractéristiques. De la même manière, chaque caractéristique a une chance sur deux d'être requise pour une demande i de transport donné.
- Les n demandes de transports ont au moins un point de départ ou d'arrivée dans un des quatre principaux hôpitaux de Tours. Les points de départs ou d'arrivées sont générés en fonction de probabilité calculées en fonction des transports réels (1/4 pour Trousseau, 1/5 pour Bretonneau, 3/20 pour Clocheville, 1/10 pour l'Ermitage, et 3/10 pour une localisation générée aléatoirement).
- Les heures de demandes sont générées suivant deux lois normales (une pour le matin $\mathcal{N}(10h00, 1h00)$ et une pour l'après midi $\mathcal{N}(16h30, 1h30)$) de manière à prendre en compte les pics de demandes constatés dans chaque demi-journée. Chaque transport a une chance sur deux d'apparaître le matin ou l'après midi.
- Le temps d'attente des patients est borné à $\epsilon = 15$ minutes, et la durée de prise en charge du patient par les ambulanciers hors véhicules varie uniformément entre 3 et 10 minutes.

7.1.4.2 Résultats pour le PLNE

Le PLNE a été testé sur cinq types de jeux de données différents comportant chacun 200 instances. Un type est simplement défini par un couple (n,m) soit (nombre de demandes, nombre de véhicules). Les tableaux 7.1 et 7.2 présentent le temps de résolution moyen (en secondes) d'une instance et le pourcentage d'instances résolues en moins d'une heure et demie par le PLNE sans coupe et sans pré-processing, puis par le PLNE avec pré-processing et les 2 premières coupes (dites "légères") 7.11 et 7.12 et enfin par le PLNE avec toutes les améliorations proposées (pré-processing et toutes les coupes). Ceci afin d'évaluer l'apport de ces techniques d'amélioration. Les coupes 7.11 et 7.12 sont dites "légères" car elles sont moins nombreuses et impliquent moins de variables que les coupes 7.13 et 7.14 qui mettent en jeu un algorithme de Floyd de calcul de plus long chemin sur un graphe. Le premier tableau montre le temps mis en moyenne par le solveur pour trouver la solution optimale avec les différentes techniques de coupes sans compter les instances non résolues. Cette résolution permet de trouver la meilleure solution en terme de coût pour l'hôpital tout en respectant une qualité de transport qui interdit des retards de plus de ϵ.

n ; m	PLNE brut	PLNE avec coupes légères	PLNE avec toutes les coupes
10 ; 5	0,06s	0,03s	0,03s
20 ; 10	60,29s	1,88s	2,01s
30 ; 15	846,68s	129,06s	150,27s
40 ; 20	-	887,5s	853,7s
50 ; 25	-	1971,3s	1707,7s

TAB. 7.1 – Temps moyen de résolution pour le PLNE

n ; m	PLNE brut	PLNE avec coupes légères	PLNE avec toutes les coupes
10 ; 5	100,0%	100,0%	100,0%
20 ; 10	99,0%	100,0%	100,0%
30 ; 15	55,5%	99,5%	100,0%
40 ; 20	0,0%	65,5%	67,5%
50 ; 25	0,0%	17,5%	18,5%

TAB. 7.2 – Pourcentage d'instances résolues par le PLNE en moins de 1h30

Au-delà de 50 demandes et 25 véhicules, peu d'instances sont résolues en moins d'une heure et demie de calcul. Les résolutions du PLNE avec coupes légères et avec toutes les coupes présentent un temps de résolution nettement inférieur à celui du PLNE brut, cependant l'apport des contraintes 7.13 et 7.14 en gain de temps semble minime. Les mêmes remarques peuvent être faites concernant le pourcentage des instances résolues. Cette résolution optimale implique un temps trop important pour être utilisée par la Centrale des Ambulanciers d'autant plus qu'elle utilise un solveur commercial, pour le suivi des véhicules et l'aide à la planification temps réel (réalisée par un régulateur). Cependant ces résultats

vont permettent d'évaluer la méthode tabou.

7.1.4.3 Résultats pour la Recherche tabou avec mémoire adaptative

Après plusieurs expérimentations préliminaires, les paramètres de l'algorithme ont été fixés aux valeurs suivantes (certaines sont aussi reprises de l'article de Taillard et al. [185]) :

- un nombre initial de solutions Nb_{init} égal à 20,
- une taille de la mémoire adaptative égale à $50 \times m$,
- des nombres d'itérations J égal à 50 et I à m,
- le calcul du nombre d'itérations de la tabou s'effectue avec A égal à 50 et B à 10,
- une probabilité de sélection dans la mémoire adaptative ρ égale à $1 - 3/$(le nombre de routes dans la mémoire).

Pour pouvoir tester l'algorithme sur de plus grandes instances que celles générées précédemment pour tester le PLNE, de nouveaux jeux de données ont été créés en faisant varier le nombre de demandes et le nombre de véhicules (cent instances par couple (n,m)). Nous avons tout d'abord comparé l'algorithme de la recherche tabou avec mémoire adaptative avec le PLNE (pré-processing et coupes légères) sur des ordinateurs possédant les mêmes caractéristiques que précédemment. Pour les instances strictement plus grandes que 40 demandes, le temps de résolution de Cplex a été borné (cf. tableau 7.3). Ce tableau 7.3 présente le temps moyen de résolution des deux méthodes ainsi que l'écart relatif moyen Δ, sachant que l'écart relatif (δ) pour une instance est défini par la relation suivante :

$$\delta = 100 \times \frac{f(S_{TS}) - f(S_{PLNE})}{MAX(f(S_{TS}); f(S_{PLNE}))}$$

Avec $f(S_{TS})$ la valeur de la fonction objectif de la meilleure solution trouvée par la recherche tabou avec la mémoire adaptative, et $f(S_{PLNE})$ la valeur de la fonction objectif de la solution optimale trouvée par Cplex pour les instances de moins de 40 demandes comprises ou de la meilleure solution trouvée dans le cas contraire (lorsque le temps de résolution du solveur est limité).

n ; m	PLNE (Cplex)	Recherche tabou avec mémoire adaptative	
	CPU(s)	Δ(%)	CPU(s)
10 ; 5	0,05	0,43	0,03
20 ; 10	1,80	0,41	0,80
30 ; 15	165	0,64	3,20
40 ; 20	4291	1,67	6,30
60 ; 30	200*	-16,20	26,20
70 ; 35	300*	-20,23	48,01

TAB. 7.3 – Comparaison des deux méthodes

* : indique la valeur du temps de résolution à laquelle le solveur est limité, la solution retournée n'est donc pas nécessairement optimale.

Nous pouvons remarquer que non seulement la recherche tabou avec mémoire adaptative trouve des solutions très proches de l'optimal mais aussi qu'elle nécessite un temps de résolution nettement inférieur pour les petites instances (plus petites que 40 demandes). Pour les autres types d'instances, la méthode trouve des meilleures solutions que Cplex en un temps très raisonnable.

Le tableau 7.4 présente l'amélioration de la meilleure solution initiale par la recherche tabou avec mémoire adaptative sur des instances plus importantes. L'écart relatif moyen Δ' est calculé de la même manière que précédemment entre la meilleure des Nb_{init} solutions initiales et la meilleure solution trouvée par la méthode.

n ; m	Recherche tabou avec mémoire adaptative	
	Δ'(%)	CPU(s)
100 ; 50	31,0	174,94
150 ; 75	33,4	855,11

TAB. 7.4 – Amélioration de la meilleure solution initiale

Le tableau 7.4 montre une amélioration moyenne de plus de 30% de la meilleure solution initiale quel que soit le jeu de données, ce qui prouve l'intérêt de l'algorithme. Toutefois, en raison du plus grand nombre de demandes et de véhicules, le temps de calcul est plus long que dans le tableau 7.3.

7.1.5 Conclusion

Les résultats préliminaires obtenus pour la version statique du problème de transports de patients ont été encourageants. En effet, l'heuristique mise en place permet d'obtenir en un temps raisonnable des solutions de bonnes qualités. De plus, dans une version dynamique du problème, les instances à résoudre à un instant t seront largement inférieures à 130 demandes (moyenne des demandes par jour à la Centrale). Enfin, la particularité de la mémoire adaptive de stocker un grand nombre de routes différentes permettrait d'obtenir une certaine robustesse de la méthode dans le cas dynamique suite à des événements perturbateurs, c'est-à-dire retrouver des solutions de bonne qualité rapidement. Cependant, outre le fait que certaines hypothèses ont été posées pour le cas statique (durée maximale de travail, pas de changement de véhicules pour les équipes et distinction des différents types de transports par un vecteur binaire), l'inconvénient de cette résolution est la prise en compte des routes des ambulances des compagnies privées. Celles-ci ne sont pas gérées par la Centrale des Ambulanciers, et elles assurent généralement peu de demandes. Il est donc inapproprié de considérer ces routes dans la résolution. Cet inconvénient a été rectifié dans la résolution du problème dynamique en plus de prendre en compte toutes les contraintes de départ.

7.2 Modéle dynamique intégrant des contraintes spécifiques aux transports hospitaliers de patients

Dans cette deuxième étude, nous considérons le problème dynamique d'optimisation de tournées d'ambulances avec l'ensemble des contraintes spécifiques à la Centrale des Ambulanciers. Nous définirons dans une première partie le problème complet et la modélisation d'une solution. Nous présenterons dans la deuxième partie, l'heuristique mise en place pour résoudre ce problème dynamique. Cette heuristique est une adaptation et une amélioration de l'heuristique précédente : la recherche tabou avec mémoire adaptative ([110], [120] et [121]). Des résultats expérimentaux sont présentés dans une dernière partie.

7.2.1 Définition et modélisation

Contrairement à ce qui a été supposé dans l'étude précédente, on considère maintenant que des demandes de transports arrivent également en temps réel et que seulement 30% des demandes en moyenne sont connues en début de journée. Ces demandes doivent donc être affectées aux ambulances du CHRU en fonction de leurs caractéristiques mais aussi de l'état de la flotte de véhicules à l'instant t (disponibilités, situations géographiques, etc.). Les demandes peuvent être aussi dans ce cas traitées par des ambulances du privé avec un coût plus élevé que si elles avaient été réalisées par celles du CHRU, mais les routes de ces ambulances ne seront pas gérées. Seuls les trajets des véhicules du CHRU seront pris en compte, les demandes non assurées par ces derniers induiront simplement un coût supplémentaire du au fait qu'elles devront être sous-traitées, ce qui dégradera la qualité de la solution.

Nous supposerons dans notre étude que les équipes de deux ambulanciers sont déjà constituées mais elles seront contraintes par des horaires de travail, ceux actuellement définis par la CA. Le nombre d'équipes travaillant en même temps varie entre 1 et 9 en fonction de la période de la journée. Les équipes sont affectées à un véhicule de départ, mais elles peuvent en changer au cours de la journée. Les deux types de véhicules sont C (classique) et A (médicalisable) répartis sur deux dépôts (Trousseau et Bretonneau).

Les demandes de transports ne sont plus caractérisées par un ensemble d'équipements ou type de véhicule requis mais seulement par un type parmi les trois suivants :

- Le transport classique : les demandes de ce type peuvent être assurées par n'importe quel type de véhicule sans contrainte particulière.
- Le transport contagieux : les demandes de ce type doivent être réalisées uniquement par des ambulances de type C. Après le transport du patient contagieux, l'ambulance doit être désinfectée à un dépôt par l'équipe ayant effectué le transport. Cependant, soit l'opération est réalisée tout de suite après le transport, soit l'équipe change de véhicule et revient désinfecter le véhicule plus tard dans la journée.
- Le transport médicalisé : les demandes de ce type doivent être réalisées uniquement par des ambulances de type A et nécessitent un médecin, provenant du service d'origine du patient, pour sa surveillance médicale pendant le transport. Après le

transport, le médecin doit être ramené à son service d'origine. Cependant, ce retour peut être réalisé avec un autre patient à bord si et seulement si le temps de détour total causé par ce patient est inférieur à une certaine durée (temps maximal perdu par le médecin dans le transport détourné). Le temps pris pour déposer le médecin n'est pas négligé et supposé constant.

Enfin, les demandes du SAMU seront modélisées par une demande classique caractérisée par un temps de réponse très court et une forte priorité.

Afin de décrire de manière formelle le problème dynamique, nous allons présenter la notation reprise, et complétée, de l'étude précédente, ainsi que la modélisation d'une solution s'appuyant aussi sur l'étude précédente.

7.2.1.1 Notations

Les notations de l'étude précédente ne permettent pas de définir entièrement le problème considéré dans cette section. D'une part des informations liées à la nature dynamique du problème et des contraintes additionnelles doivent être ajoutées, d'autre part une distinction entre les équipes et les ambulances doit être faite. La nouvelle notation du problème est la suivante :

- Un ensemble $\mathcal{M}$ d'équipes : une équipe, constituée de deux ambulanciers, est affectée à un véhicule de départ. Chaque équipe $k \in \mathcal{M}$ est caractérisée par :
  - une date de disponibilité qui correspond à l'heure d'embauche de l'équipe k,
  - un dépôt D_k représentant le lieu de départ de l'équipe et le lieu où doit revenir l'équipe après sa journée de travail,
  - une date à laquelle l'équipe doit revenir au dépôt qui correspond à l'heure de fin de travail. Pour ne pas être trop contraint sur l'heure de fin de travail, les équipes peuvent effectuer des heures supplémentaires. Cependant, les solutions avec des heures supplémentaires sont pénalisées par un coût défini par : $e^{(r_k - T)}$ en notant r_k la quantité de travail supplémentaire effectuée par l'équipe k et T une durée de travail supplémentaire considérée comme acceptable.
- Un ensemble $\mathcal{V}$ de véhicules. Les équipes peuvent changer plusieurs fois de véhicules au cours de la journée. Cette opération ne peut s'effectuer qu'à l'un des deux dépôts et nécessite un temps de changement noté p_{ch}. Chaque véhicule $v \in \mathcal{V}$ est caractérisé par :
  - un type : C pour les ambulances classiques, A pour les ambulances médicalisables. Chaque type de véhicule existe en nombre limité.
  - un coût $w^v_{i,j}$ si le véhicule v réalise la demande i puis la demande j (déplacement vers le point de départ de cette demande). Ce terme dépend encore des frais kilométriques et du type du véhicule (le type A coûte plus cher que le type C).
  - un dépôt D_v qui représente l'emplacement du véhicule à chaque début et fin de journée.
- Un ensemble $\mathcal{R}$ de demandes : chaque demande $i \in \mathcal{R}$ est caractérisée par :
  - un point de départ dep_i et d'arrivée $dest_i$ correspondant respectivement à l'unité de soin de départ et d'arrivée du patient,
  - un type de transport parmi {classique, contagieux, médicalisé},

  - une priorité, notée $Prio_i$ comprise entre 0 et 4 : la priorité 0 correspond à la demande de transport la plus urgente (en particulier celle émanant du SAMU),
  - un temps $t_{dep_i,dest_i}$ de déplacement du véhicule entre le lieu de départ dep_i et de destination $dest_i$ de la demande i,
  - une durée p_i de prise en charge du patient par les ambulanciers pour effectuer le transport en dehors du véhicule,
  - une date à partir de laquelle le transport peut commencer, notée e_i. Nous associons aussi une fenêtre de temps à l'intérieur de laquelle le transport doit commencer. Cette fenêtre de temps dépend de la priorité de la demande. Lorsque la demande est urgente, la fenêtre de temps associée est étroite, tandis que si la demande est moins urgente, la fenêtre de temps est plus large. Pour prendre en compte cette notion, une demande i est associée à une fenêtre de temps définie par $[e_i, e_i + \alpha_i]$ où $\alpha_i = \tau_0 + \delta \times Prio_i$ avec τ_0 la valeur du retard maximum autorisé pour la plus urgente des demandes et δ la différence en minutes entre deux niveaux de priorités.
  - un coût de sous-traitance noté cs_i. Ce coût dépend de la demande mais pas de la compagnie privée appelée pour l'assurer. Ce coût est strictement plus grand que le coût de l'affecter à une ambulance du CHRU. Par conséquent, l'objectif pour le CHRU est d'assurer le plus de transports possible. Nous appellerons "demande non satisfaite" une demande de transport qui est affectée à une compagnie privée, ou encore une demande non assurée par les ambulances du CHRU.
- Le temps de désinfection est noté p_{des}.
- Le temps pris pour déposer le médecin est noté p_{med}.
- Le temps maximal de détour total accepté par un médecin est noté t_{max}.

Les données liées à la nature dynamique du problème sont les suivantes :
- l'état de chaque véhicule à un instant t ("utilisé par une équipe", "doit être désinfecté", "disponible"), et leurs positions.
- La date de disponibilité de chaque équipe qui correspond soit à l'heure d'embauche, soit à la fin de leur activité courante (transport en cours, désinfection, etc.), soit la date courante s'il n'exécute aucune activité.
- La localisation ou le point de départ de chaque équipe à sa date de disponibilité.

Comme l'étude précédente, le problème consiste à affecter les demandes de transports aux équipes du CHRU, mais cette fois-ci en temps réel et de déterminer les routes de chaque véhicule. La fonction objectif est de minimiser les coûts de transports assurés par le CHRU, plus les coûts des transports sous-traités, plus une pénalité pour les heures supplémentaires réalisées par chaque équipe.

7.2.1.2 Modélisation

La modélisation est basée sur celle présentée dans l'étude du problème statique. Une solution à un instant t est constituée d'un ensemble de routes, avec une route par équipe. Une route est une liste de sommets, définie de la manière suivante :
- un sommet '*' symbolisant la position de l'équipe à la fin de son activité courante ou sa position courante si elle n'effectue aucune activité,

- des sommets 'activités' représentant :
  - soit une activité de transport d'un patient,
  - soit une activité de changement de véhicule à un dépôt,
  - soit une activité de désinfection d'un véhicule à un dépôt, ces sommets sont insérés après les transports contagieux d'un patient,
  - soit une activité de retour de médecin à son unité de soin d'origine, ces sommets sont insérés après les transports médicalisés,
- un sommet D_k représentant le dépôt de l'équipe k.

Par rapport à la modélisation de l'étude précédente, la notion de longueur $d_{i,j}$ sur un arc entre deux sommets i et j est étendue. La longueur représente encore le durée nécessaire entre le début de l'activité i et le début de l'activité j. Mais le calcul de $d_{i,j}$ dépend donc des sommets i et j. Les principaux cas sont les suivants :

- si i et j représentent des demandes de transports : $d_{i,j} = t_{dep_i,dest_i} + p_i + t_{dest_i,dep_j}$ (identique à la modélisation précédente, section 7.1.1.2),
- si i est une demande de transport et j un dépôt D (cas d'une désinfection d'un véhicule, d'un changement de véhicule ou encore d'une fin de travail d'une équipe) : $d_{i,j} = t_{dep_i,dest_i} + p_i + t_{dest_i,D}$
- si i est un dépôt D et j une demande de transport : $d_{i,j} = p + t_{D,dep_j}$ avec p égal à p_{ch} pour un changement de véhicule ou égal à p_{des} pour une opération de désinfection.
- si i est une demande de transport et j le retour de médecin au point dep_u : $d_{i,j} = t_{dep_i,dest_i} + p_i + t_{dest_i,dep_u}$ (dans le cas d'un retour direct du médecin après le transport du patient : $dep_u = dep_i$).

Exemple :
La figure 7.3 montre un exemple avec 5 demandes de transports, 2 équipes, 4 services de soins et un seul dépôt. Les demandes sont $\mathcal{R} = \{a, b, c, d, e\}$ avec a, b, et c des demandes de transports classiques, d une demande de transport médicalisée et e une demande de transport contagieux.

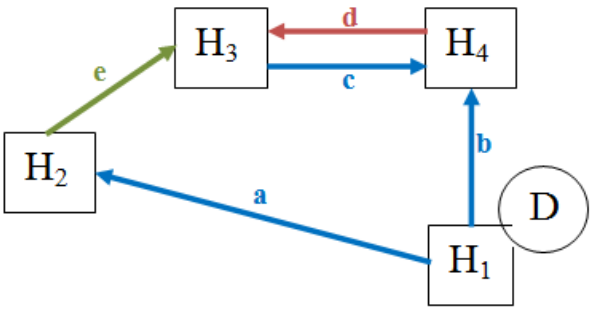


FIG. 7.3 – Illustration de l'exemple

Les figures 7.4 et 7.5 montrent une solution pour cet exemple. Le sommet '*' correspond à la position courante des équipes à l'instant t. Dans cet exemple, l'équipe 1 réalise le transport e puis change son véhicule de type C pour un autre véhicule, assure la de-

mande a et retourne au dépôt pour désinfecter le véhicule qu'elle a utilisé pour le transport contagieux. L'équipe 2 commence par changer son véhicule de type C pour un véhicule de type A, réalise le transport b puis le transport médicalisée d, ramène le médecin (sommet d' qui a été inséré après le transport d), mais le retour s'effectue en même temps qu'un autre transport de patient c. Enfin l'équipe retourne au dépôt pour récupérer son véhicule d'origine.

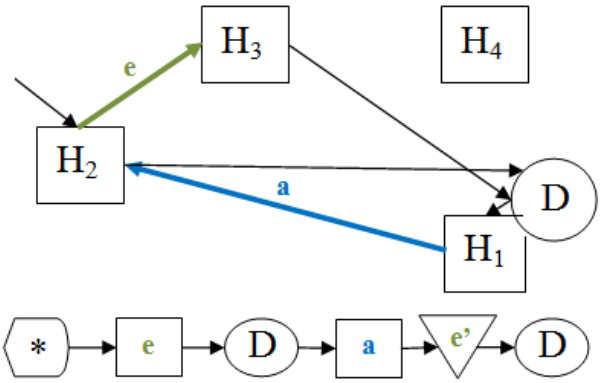


FIG. 7.4 – Route de l'équipe 1

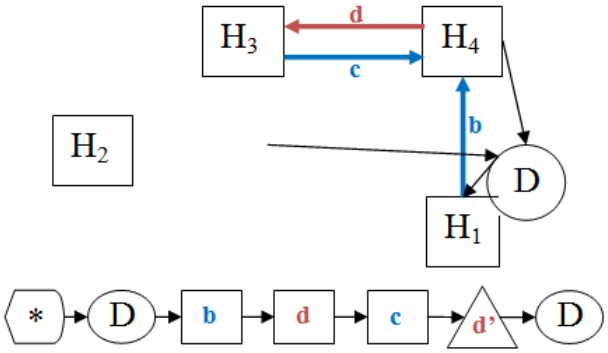


FIG. 7.5 – Route de l'équipe 2

7.2.2 Recherche tabou avec mémoire adaptative dans le cas dynamique

La méthode de résolution dans le cas dynamique est basée sur la recherche tabou avec mémoire adaptative du cas statique. Cette méthode de résolution a déjà fait ses preuves en termes de performance sur d'autres problèmes dynamiques de tournées de véhicules. Initialement décrite dans l'article de Taillard et al. [185] dans le cas statique, la méthode fut rapidement reprise pour résoudre ce même problème dans sa version statique (Gendreau et al. [82]) avec une implémentation parallélisée se basant sur l'article de Badeau et al. [9]. Peu de temps après, la méthode fut améliorée en intégrant la notion de détournement de véhicule (Ichoua et al., 2000 [102]). Cette notion consiste à détourner un véhicule de sa destination prévue pour desservir un nouveau client proche de sa localisation courante, contrairement aux cas précédents qui supposent la prochaine destination d'un véhicule

fixée. Enfin, une autre extension de cette méthode est présentée dans l'article de Gendreau et al. en 2006 [81]. Dans cette extension, les clients représentent des demandes de transports de biens, avec pour chaque demande un point de départ et un point de destination. Le problème abordé par les auteurs est une application typique des problèmes des services de courriers dans un environnement dynamique.

Pour adapter la méthode dans le cas dynamique avec l'ensemble des nouvelles contraintes, nous nous sommes inspirés de ces articles. Nous avons aussi intégré la notion de détournement de véhicule mais sans parallèlisation de la méthode. La recherche tabou avec mémoire adaptative étant déjà décrite dans la section 7.1.3, cette section présente uniquement les modifications de la méthode pour cette adaptation.

7.2.2.1 Structure générale

L'idée de l'algorithme est sensiblement la même que dans le cas statique. L'algorithme 7 $TSAM_{Dyn}$ décrit les grandes étapes de la méthode. Cependant, la résolution est effectuée à chaque nouvelle demande de transport apparue à l'instant t avec la mémoire adaptative (AM) de la précédente résolution à l'instant $t - \Delta$. Lorsqu'une nouvelle demande apparaît, la liste des routes de la mémoire doit être mise à jour : les demandes de transports réalisées sont supprimées, les positions des équipes et leurs dates de disponibilité sont modifiées. La nouvelle demande est considérée à cette étape comme non satisfaite. Contrairement au cas statique, lors de la reconstruction d'une solution à partir des routes de la mémoire adaptative, certaines demandes peuvent être non satisfaites, c'est-à-dire qu'elles ne sont assurées par aucune des ambulances du CHRU et sont donc par défaut sous-traitées. Des étapes consistant à essayer de réinsérer les demandes non satisfaites dans les routes des véhicules ont donc été ajoutées dans l'algorithme. Le principe de décomposer et recomposer une solution durant I itérations reste le même. Cependant les deux sous-ensembles des routes de la solution ne sont plus nécessairement disjoints. De plus, les deux exécutions successives de la recherche tabou sur les sous-ensembles des routes utilisent la même liste tabou. Enfin, une étape d'amélioration de la solution courante à la ligne 11 de l'algorithme a été ajoutée de manière à améliorer les affectations des dépôts de changement des ambulances.

7.2.2.2 La mémoire adaptative

Une action supplémentaire vient s'ajouter à la mémoire adaptative, elle consiste à mettre à jour les routes suite à une nouvelle demande à un instant t : supprimer les demandes réalisées et modifier les positions des équipes et leurs dates de disponibilité. Pour cette dernière modification, si une équipe est en train d'effectuer un transport (soit d'un patient soit d'un médecin) sa date de disponibilité est égale à la date de fin du transport, et sa position finale devient le prochain point de départ de l'équipe. Si une équipe n'effectue aucun transport, sa date de disponibilité est égale à l'instant t et le point de départ de l'équipe est sa position courante. Une équipe peut être donc en chemin vers la demande de transport suivante. Cette gestion de mise à jour de la mémoire adaptive permet ainsi la notion de détournement d'une ambulance si une demande de transport apparaît dans

Algorithme 7 $TSAM_{Dyn}$

1: $AM\,(t) \leftarrow$ Mise à jour de $AM\,(t-\Delta)$
2: **Pour** $j = 1$ to J **faire**
3: $S \leftarrow$ solution construite à partir de $AM\,(t)$ (les demandes n'apparaissant pas dans S constituent les demandes non satisfaites)
4: Insertion autant que possible des demandes non satisfaites dans les routes de S
5: **Pour** $i = 1$ to I **faire**
6: *Décomposition* : création de deux sous-ensembles de routes S_1 et S_2 à partir de S
7: Appliquer la recherche tabou sur S_1 pour obtenir S'_1
8: Appliquer la recherche tabou sur S_2 pour obtenir S'_2, en gardant la même liste tabou
9: *Reconstruction* : rassembler S'_1 et S'_2 pour créer une nouvelle solution S'
10: $S \leftarrow S'$
11: Amélioration de S (réorganisation des dépôts de changement de véhicules)
12: Insertion autant que possible des demandes non satisfaites dans les routes de S
13: **Fin pour**
14: Ajouter les routes de S dans $AM\,(t)$
15: **Fin pour**
16: Post-optimisation sur la meilleure solution trouvée et ajout des routes dans $AM\,(t)$

le voisinage de sa position actuelle. Pour toute équipe dont l'horaire de fin de travail est inférieure ou égale à t, on supprime les routes qui lui sont affectées.

L'action d'ajout de routes dans la mémoire adaptative ne diffère pas du cas statique. Cependant, pour la construction d'une nouvelle solution (ligne 3 de l'algorithme 7 $TSAM_{Dyn}$) il faut tenir compte d'un nouveau facteur. Les ambulanciers peuvent changer de véhicules, une route de la mémoire adaptative requiert donc la disponibilité simultanée d'une équipe d'ambulanciers donnée et d'une ambulance donnée. Après la sélection d'une route de la mémoire adaptative pour construire une solution, il faut interdire de sélectionner, pour compléter la solution, les routes de la mémoire adaptative utilisant au même moment cette ambulance ou cette équipe.

7.2.2.3 Procédure d'initialisation

Puisqu'au début de la journée ($t = 0$), la Centrale des Ambulanciers a connaissance d'approximativement 30% des demandes de transports qui devront être effectuées dans la journée. La mémoire adaptative est initialisée avec plusieurs solutions construites à partir de ces demandes. Pour construire une solution, les véhicules sont tout d'abord placés de manière aléatoire dans une liste. Puis les demandes sont traitées dans un ordre arbitraire : une demande est assurée par le premier véhicule de la liste qui peut la satisfaire en respectant toutes les contraintes. Lorsqu'une demande de transport médicalisé ou contagieux est insérée dans une route, les sommets représentant les changements de véhicules ou les opérations de désinfection ou encore les retours des médecins sont également ajoutés afin que cette route demeure réaliste. Comme pour l'initialisation du cas statique, la recherche

tabou avec un petit nombre d'itérations est exécutée sur chaque solution initiale.

7.2.2.4 Procédure d'amélioration

Pour améliorer une solution, deux types de procédures ont été ajoutées : "Insertion des demandes non satisfaites" (lignes 4 et 12) et "réorganisation des dépôts de changements des véhicules" (ligne 11).

Après la construction d'une solution à partir de la mémoire adaptative, certaines demandes de transports peuvent être non satisfaites. Par défaut, ces demandes sont sous-traitées aux ambulances du privé et génèrent un coût. Pour améliorer la solution, les demandes doivent être insérées dans la solution actuelle. La procédure consiste donc à essayer d'insérer les demandes une par une dans l'une des routes de la solution à condition que cette insertion réduise le coût de la solution. Quand un transport médicalisé est inséré, la procédure insère aussi les sommets correspondant au changement de véhicule et le sommet correspondant au retour du médecin. Le traitement est semblable pour les demandes de transports contagieux avec les sommets de changement de véhicule et le sommet de l'opération de désinfection.

La deuxième procédure d'amélioration est due au fait que certaines demandes de transports ont besoin d'un changement de véhicule (de type C ou A) obligeant les équipes à emprunter des ambulances plusieurs fois par jour et à différents dépôts. Les routes des équipes évoluant dynamiquement, il est parfois intéressant de modifier le dépôt où le changement de véhicule s'effectuera. Cette procédure consiste à réaffecter les dépôts de changement des véhicules dans l'ordre croissant des dates de changement des équipes. Le dépôt le plus prêt possible de l'équipe lui est affecté sachant qu'une ambulance ne peut être empruntée que par une seule équipe à la fois.

7.2.2.5 Diversification

La procédure de diversification est identique à celle de l'algorithme du cas statique. Lorsque la meilleure solution a été générée plus de trois fois durant les I itérations, l'ordre de sélection des routes dans la mémoire adaptative est inversé en commençant par les routes de moins bonne qualité.

7.2.2.6 Décomposition et reconstruction des solutions

La phase de décomposition des routes d'une solution permet de diminuer le temps de résolution car elle réduit l'ensemble des solutions du voisinage de la recherche tabou. Contrairement au cas statique, la résolution ne considère pas toutes les demandes de transports. Certaines demandes ont déjà été traitées et d'autres ne sont pas encore connues. Les instances à résoudre à un instant t sont en conséquence moins importantes. L'une des améliorations de l'algorithme au cas dynamique a été de ré-augmenter l'ensemble des solutions du voisinage de la recherche tabou pour pouvoir continuer à améliorer les solutions tout en gardant un temps de résolution raisonnable. Pour cette raison, l'ensemble des routes S_1 et

S_2 ne sont plus deux sous-ensembles disjoints. A chaque itération i, les routes correspondant à la $(i\ mod(m))^{\text{ième}}$ équipe est sélectionnée avec les mêmes approches : géographique ou temporelle. Cependant, les $m \times 2/3$ routes les plus similaires selon l'approche choisie sont rassemblées pour former l'ensemble S_1, et les $m \times 2/3$ les moins similaires forment l'ensemble S_2. Après la décomposition, la recherche tabou est exécutée sur chaque sous-ensemble de routes successivement mais en utilisant la même liste tabou contrairement au cas statique. La reconstruction de la solution courante consiste simplement à réaliser l'union des routes de S_2' et celles de S_1' (qui ne sont pas dans S_2').

7.2.2.7 Post optimisation

Tout comme le cas statique, une post optimisation est appliquée sur la meilleure solution trouvée à la fin de l'algorithme. Cette opération utilise le même processus qu'à l'initialisation : appliquer la recherche tabou avec un faible nombre d'itérations mais sur toutes les routes de la solution simultanément.

7.2.2.8 Recherche tabou

La recherche tabou dans le cas dynamique présente la même structure générale que la recherche tabou dans le cas statique. La liste tabou et le critère d'arrêt sont également identiques. L'ensemble des solutions du voisinage est déterminé encore par l'opérateur CROSS exchange. Cependant, il a fallu l'adapter pour prendre en compte les contraintes additionnelles, et en particulier les différents types de sommets des routes. Un certain nombre d'échanges de sous-segments sont interdits de manière à toujours obtenir une solution réalisable. Par exemple, lorsqu'un sous-segment d'une route contenant une demande de transport médicalisé est échangé avec un autre sous-segment d'une autre route, il faut vérifier :

- soit que le premier sous-segment est échangé avec les sommets représentant le changement d'ambulance pour un type A,
- soit que le premier sous-segment est inséré dans la deuxième route à un point où l'équipe possède une ambulance de type A.

De plus, certains sommets ne peuvent être affectés qu'à une route bien précise. C'est le cas par exemple du sommet symbolisant la désinfection. Si un transport contagieux a été effectué par une équipe, mais que l'ambulance n'est pas encore désinfectée, l'équipe peut tout de même emprunter une autre ambulance pour continuer à assurer d'autres transports. Cependant, la résolution doit prendre en compte le fait que l'équipe doit revenir désinfecter l'ambulance. Le sommet symbolisant cette action ne doit donc pas être affecté à une autre route.

Contrairement au cas statique, le calcul d'une solution voisine de la solution courante ne peut pas être effectué avant de réaliser l'échange des sous-segments car la fonction objectif prend en compte le retard des équipes. Lorsque deux sous-segments de deux routes différentes sont échangés, la solution obtenue n'est pas nécessairement réalisable. En particulier, il faut vérifier que toutes les demandes sont traitées à l'heure (fenêtre de temps)

et que la date de retour du médecin à son service d'origine est valide. Enfin, il faut tenir à jour un planning d'utilisation des ambulances pour calculer l'éventuel temps d'attendre d'une équipe devant changer de véhicule. Un temps d'attente trop long peut rendre la route irréalisable.

7.2.3 Résultats expérimentaux

Le système d'information mis en place à la centrale pour aider les régulateurs à planifier les demandes de transports (PTAH) permet d'obtenir quelques renseignements sur les demandes réalisées chaque jour. Malheureusement, toutes les données sur ces demandes de transports ne sont pas systématiquement rentrées dans le système. Si un service n'effectue pas de demandes par saisie sur le logiciel PTAH, mais directement par téléphone à la Centrale, les régulateurs ne sont pas obligés de saisir la demande et peuvent la traiter directement. Nous n'avons donc obtenu de l'hôpital qu'un ensemble de données incomplet. Cependant, nous avons extrait des caractéristiques, de manière à générer des instances les plus réalistes possible. Avant de présenter la génération d'instances, nous avons étudié le degré de dynamisme du problème selon les formulations proposées dans la littérature (Larsen [132] et Ghiani et al. [86]). Parmi les données de l'hôpital, nous avons extrait 10 jours sélectionnés aléatoirement avec assez d'informations pour calculer deux degrés de dynamisme Ψ et Ψ' définis par :

$$\Psi = \frac{|\mathcal{R}_d|}{|\mathcal{R}|} \qquad \Psi' = \frac{\sum_{i \in \mathcal{R}} \left[T - (e_i + \alpha_i - t_i^{app})\right] / T}{|\mathcal{R}|}$$

Avec $\mathcal{R}_d$ l'ensemble des demandes dynamiques (qui ne sont pas connues à l'avance), $[0, T]$ l'horizon de la planification et t_i^{app} la date d'apparition de la demande i (les demandes statiques sont caractérisées par $t_i^{app} = 0$). Ψ et Ψ' peuvent varier entre 0 (problème statique) et 1 (problème totalement dynamique). La première définition du degré de dynamisme ne prend en compte ni les dates d'apparition ni les fenêtres de temps. C'est pourquoi Larsen a étendu cette définition et a introduit une seconde définition de degré de dynamisme. Cette seconde définition s'appuie sur la durée durant laquelle les régulateurs peuvent agir pour planifier une demande i : $(e_i + \alpha_i - t_i^{app})$. Le tableau 7.5 montre les degrés de dynamisme observé sur ces 10 jours.

$Jours$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\|\mathcal{R}\|$	132	91	90	92	115	113	128	99	126	125
Ψ	0,62	0,62	0,66	0,66	0,53	0,55	0,52	0,58	0,47	0,58
Ψ'	0,73	0,74	0,75	0,76	0,68	0,69	0,70	0,69	0,62	0,72

TAB. 7.5 – Degrés de dynamisme d'instances réelles

En considérant les fenêtres de temps et les dates d'apparitions, le problème apparaît comme fortement dynamique, sachant que toutes les demandes n'apparaissent pas dans les données (certaines demandes n'étant pas saisies, elles ne sont pas incluses dans les calculs). Le premier jour du tableau représente la journée la plus complète au niveau des données. Nous avons été en mesure de recréer une instance représentant 90% de cette journée pour tester notre algorithme. Nous présentons ces résultats en fin de section.

7.2.3.1 Génération d'instances

De manière à tester l'algorithme dans un environnement dynamique, nous avons généré aléatoirement de nouvelles instances dont les caractéristiques sont encore une fois inspirées de l'activité réelle de la Centrale des Ambulanciers, en prenant en compte l'arrivée en temps réel des demandes. Le langage utilisé pour l'implémentation est le C++. L'ordinateur utilisé est un Pentium(R) 4 CPU 3.00 GHz, 1.00 Go de RAM. Les instances générées possèdent les caractéristiques suivantes :

- La période est d'une journée, de 6h00 à 21h00.
- Les données associées aux équipes sont les suivantes :
  - Le nombre d'équipes total est égal à $|\mathcal{M}| = 11$. Les horaires de chaque équipe correspondent aux horaires réels des équipes de la Centrale des Ambulanciers donnés dans le tableau 1.1 de la section 1.3.1.1. Le quota d'heure supplémentaire acceptable a été fixée à $T = 30$ min.
  - Les affectations des équipes aux dépôts sont aussi celles du cas réel (5 à Trousseau et 6 à Bretonneau).

- Les données associées aux véhicules sont les suivantes :
  - il y a un total de $|\mathcal{V}| = 15$ véhicules qui se répartissent en 13 de type C et 2 de type A.
  - Les coûts $w^v_{i,j}$ sont calculés en fonction des frais kilométriques, établis à $0,2 \times (t_{dep_i,dest_i} + t_{dest_i,dep_j})$ plus un coût additionnel de 15 si un véhicule de type A est utilisé.
  - 7 ambulances de type C et 1 de type A sont affectées à Trousseau, le reste est affecté à Bretonneau.

- Les données associées aux demandes sont les suivantes :
  - Le nombre total de demandes par jour est invariablement de 130 :
    - le pourcentage de demandes connues dès le début de la journée est généré uniformément entre 25% et 35%.
    - le nombre de transports médicalisés est généré uniformément entre 5 et 20.
    - le nombre de transports contagieux est généré uniformément entre 2 et 8.
    - les transports restants sont des transports classiques. Parmi ceux ci, tous ne sont pas indépendants, certains sont des transports "aller-retour" d'un patient. Etant considérées comme deux demandes de transports classiques, la seconde demande de transport est à réaliser après la première, et elle n'est connue qu'après l'apparition de la première. Il y a 30 demandes de transports "aller-retour" par jour, ce qui correspond donc à un total de 60 transports.
  - Les données numériques sont les suivantes :

$Prio_i \in [0,4]$	$p_i \in [5,40]$ min.	$\tau_0 = 5$
$e_i \sim \mathcal{N}(330,300)$ (matin)	$e_i \sim \mathcal{N}(600,300)$ (après midi)	$\delta = 5$
$p_{max} = 15$ min.	$p_{ch} = 10$ min.	$p_{med} = 5$ min.
$p_{des} = 60$ min.		

  - Les demandes qui ne sont pas connues à l'avance arrivent entre 10 et 240 minutes avant la date effective du début au plus tôt du transport.

– Le coût de sous-traitance d'une demande est défini par $1,5 \times t_{dep_i,dest_i} + 60$ (60 représente un forfait fixe de mobilisation) plus une constante additionnelle si une ambulance de type A est utilisée, ou si une désinfection est nécessaire après le transport.

Cinq jeux de données constitués de 200 instances chacuns, ont été générés. Ces jeux de données se différencient par le nombre de demandes émanant du SAMU représentées par des demandes de transports classiques. Ces demandes sont connues entre 5 et 40 minutes en avance seulement. Elles possèdent la plus forte priorité ($Prio_i = 0$). Ces 5 types d'instances (Type I, II, III, IV et V) correspondent respectivement à l'hypothèse que 0%, 5%, 10%, 15% et 20% des 130 demandes proviennent du SAMU. Dans le cas réel, la CA est confrontée en moyenne à un ratio de 10% des demandes. Le tableau 7.6 montre la moyenne des deux degrés de dynamismes pour les différents jeux de données.

Type d'instances	I	II	III	IV	V
Ψ	0,73	0,74	0,75	0,75	0,76
Ψ'	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81

TAB. 7.6 – Degrés de dynamisme des instances générées

Les degrés de dynamisme des instances générées sont plus importants que les données réelles car nous avons considérés que chaque demande non saisie dans le système était une demande non connue à l'avance.

7.2.3.2 Paramètres de l'algorithme

Après des tests préliminaires, les paramètres de l'algorithme ont été ajustés aux valeurs suivantes :

Nombre de solutions initiales	$Nb_{init} = 50$
Taille de la mémoire adaptative ($50 \times \lvert\mathcal{M}\rvert$)	$= 550$ routes
Nombre d'itérations ($I = 2 \times \lvert\mathcal{M}\rvert$)	$J = 5$ et $I = 22$
Paramètre d'itérations de la tabou	$A = 7$ et $B = 3$
Probabilité de sélection ρ	$= 1 - 1/4$
Nombre d'itérations pour la tabou à l'étape d'initialisation	$= 5$
Nombre d'itérations pour la tabou à l'étape de post optimisation	$= 10$

Le délai de réponse de la méthode est un point important, elle est exécutée à l'arrivée de chaque nouvelle demande, et doit proposer rapidement une solution au régulateur. Or ce délai dépend essentiellement du nombre d'itérations J de la boucle principale (ligne 2 de l'algorithme 7). Nous avons donc mené une étude sur la valeur de J afin de dégager un compromis entre une bonne qualité de solution et un temps de réponse raisonnable. Chaque itération j de cette boucle construit une meilleure solution locale So_j qui sert à faire évoluer la mémoire adaptative. Au sortir de la boucle, la meilleure des solutions trouvées (probablement So_J) est proposée au régulateur après une étape de post optimisation. Après avoir fixé arbitrairement $J = 20$, nous avons observé l'évolution des solutions So_j,

plus précisément l'amélioration relative Δ_j de So_j par rapport à So_1, la solution trouvée à la fin de la première itération de la boucle.

$$\Delta_j = \frac{f(So_1) - f(So_j)}{f(So_1)}$$

Cette étude a été menée sur des instances de type III telles qu'elles sont décrites dans la section 7.2.3.1, le graphique 7.6 représente l'évolution de la valeur moyenne de Δ_j sur les diverses instances. Il apparaît qu'au-delà de cinq itérations, l'amélioration est minime, nous avons donc décidé de poser $J = 5$ autrement dit de limiter à 5 le nombre d'itérations de la boucle principale de $TSAM_{Dyn}$. De plus, cela correspond à un temps d'exécution de la méthode d'approximativement 2 secondes.

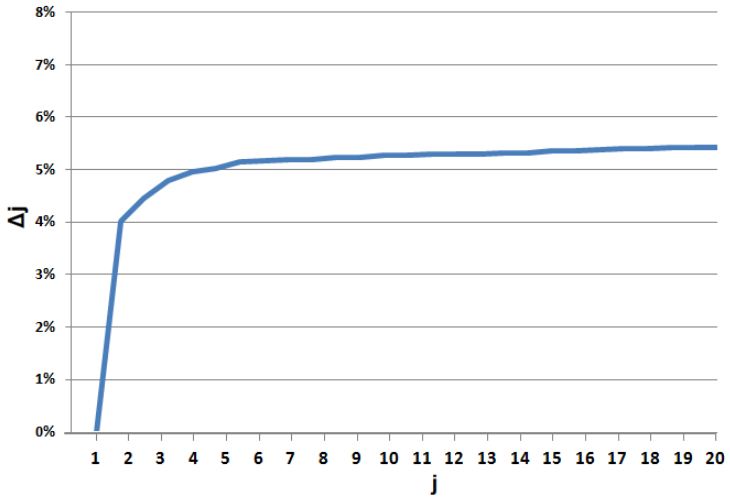


FIG. 7.6 – Evolution de la qualité des solutions en fonction du nombre d'itération j

7.2.3.3 Résultats expérimentaux

Tout d'abord, nous avons comparé les solutions données par l'algorithme dans le cas dynamique aux solutions données par une version de cet algorithme dans le cas statique où toutes les données sont connues à l'instant $t = 0$. Dans ce dernier cas, toutes les demandes doivent être insérées dans les solutions initiales. Nous notons $TSAM_{Static}$ l'algorithme dans le cas statique. Ce dernier ne possède pas les mêmes paramètres que l'algorithme du cas dynamique. Contrairement à ce cas, l'algorithme $TSAM_{Static}$ prend en compte l'ensemble des demandes pour une résolution en une seule fois. Ses paramètres ont donc été modifiés pour augmenter son efficacité à obtenir les meilleures solutions possibles. Les nouveaux paramètres sont les suivants : taille de la mémoire adaptative = 1100 routes, $J = 50$, $I = 44$, $A = 25$ and $B = 1$.

Le tableau 7.7 présente les résultats de $TSAM_{Static}$ et les résultats de l'algorithme dans

sa version dynamique noté $TSAM_{Dyn}$. Δ est la déviation relative définie par :

$$\Delta = \frac{f(Algo_{Dyn}) - f(Algo_{Static})}{f(Algo_{Dyn})}$$

Types des instances	Moyenne Δ	Ecart type	Maximum	Minimum	Pourcentage des instances où $f(TSAM_{Dyn}) < f(TSAM_{Static})$
Type I	3,39%	5,02%	28,21%	-9,15%	23,5%
Type II	2,93%	4,31%	13,83%	-7,14%	26%
Type III	2,82%	4,7%	22,16%	-21,18%	26%
Type IV	2,34%	4,2%	26,91%	-7,45%	31%
Type V	2,88%	4,07%	14,48%	-5,13%	27%

TAB. 7.7 – Comparaison entre $TSAM_{Dyn}$ et $TSAM_{Static}$

Ce tableau montre que quel que soit le nombre de demandes de transports émanant du SAMU, les performances de $TSAM_{Dyn}$ sont stables. La qualité des solutions obtenues est en moyenne 2,34% à 3,39% plus mauvaise que dans les cas statique. La dernière colonne montre qu'entre 23,5% et 31% des instances, $TSAM_{Dyn}$ est meilleur que $TSAM_{Static}$. Pour ces instances, l'exécution de l'algorithme itérativement pour chaque nouvelle demande est meilleure qu'une seule exécution de l'algorithme avec toutes les demandes à la fois.

La structure de l'algorithme est ensuite testée, en particulier l'utilisation de la mémoire adaptative et l'impact de la liste tabou, toujours dans le cas dynamique. Nous notons $TSAM_{Dyn-AM}$ l'algorithme sans la mémoire adaptative (c.-à-d. la mémoire adaptative contient uniquement la meilleure solution trouvée) et $TSAM_{Dyn-LT}$ l'algorithme sans la liste tabou. Les tableaux 7.8 et 7.9 présentent les résultats des comparaison entre $TSAM_{Dyn-AM}$ et $TSAM_{Dyn-LT}$ de la même manière que la comparaison avec l'algorithme dans le cas statique.

Types des instances	Moyenne Δ	Ecart type	Maximum	Minimum	Pourcentage des instances où $f(TSAM_{Dyn}) < f(TSAM_{Dyn-AM})$
Type I	-6,18%	5,57%	3,17%	-48,41%	92,50%
Type II	-4,41%	5,40%	11,30%	-23,56%	89,50%
Type III	-4,46%	4,36%	4,90%	-30,49%	88,00%
Type IV	-3,83%	5,31%	13,46%	-58,78%	84,50%
Type V	-3,74%	3,60%	6,51%	-15,19%	85,00%

TAB. 7.8 – Comparaison entre $TSAM_{Dyn}$ et $TSAM_{Dyn-AM}$

Les tableaux 7.8 et 7.9 montrent que dans les deux cas, la mémoire adaptative et la liste tabou ont une influence positive sur la qualité des solutions. Pour en moyenne 87,9% et 82,6% des instances, la qualité des solutions décroit sans mémoire adaptative et sans liste tabou respectivement.

Types des instances	Moyenne Δ	Ecart type	Maximum	Minimum	Pourcentage des instances où $f(TSAM_{Dyn}) < f(TSAM_{Dyn-LT})$
Type I	-4,71%	5,23%	4,66%	-46,45%	83,00%
Type II	-3,25%	5,48%	14,18%	-22,15%	86,00%
Type III	-3,68%	3,71%	4,12%	-20,47%	84,00%
Type IV	-2,87%	3,33%	11,59%	-11,05%	80,00%
Type V	-2,68%	3,23%	7,27%	-11,91%	80,00%

TAB. 7.9 – Comparaison entre $TSAM_{Dyn}$ et $TSAM_{Dyn-LT}$

L'élément le plus important dans la valeur de la fonction objectif de chaque solution est le nombre de demandes sous-traitées au privée. Le tableau 7.10 présente pour chaque algorithme le nombre moyen de demandes sous-traitées. De plus, nous avons étudié une borne inférieure du nombre de ces demandes, notée BI_{sub}. Pour déterminer cette borne inférieure, nous avons utilisé le solveur Cplex pour résoudre le PLNE suivant :

- Variables : $\forall i \in \mathcal{R}, \forall k \in \mathcal{M} : x_{ik} = 1$ si l'équipe k réalise la demande i, 0 sinon.
- Fonction objectif : Maximiser ($\sum_{\forall i \in \mathcal{R}} \sum_{\forall k \in \mathcal{M}} x_{ik}$)
- Contraintes :
  - Une demande i est assurée par au plus une équipe : $\forall i \in \mathcal{R} : \sum_{\forall k \in \mathcal{M}} x_{ik} \leq 1$
  - Si le temps de travail d'une équipe k ne permet pas de réaliser la demande i à l'heure alors : $x_{ik} = 0$
  - Si deux demandes i et j ne peuvent pas être réalisées simultanément à l'heure par une même équipe alors : $\forall k \in \mathcal{M} : x_{ik} + x_{jk} \leq 1$

  Les deux dernières contraintes prennent en compte les fenêtres de temps, les temps de trajets entre sites, les temps de prises en charge du patient hors véhicule et les activités nécessaires pour les transports médicalisés et les transports contagieux. Cependant, nous ne pouvons pas prendre en compte les temps de désinfections et de changement des véhicules étant donné que nous ne savons pas quand ces opérations auront lieu.

Types	BI_{sub}	$TSAM_{Dyn}$	$TSAM_{Dyn-AM}$	$TSAM_{Dyn-LT}$
Type I	24	34,685	36,93	37,150
Type II	26	37,465	39,495	39,785
Type III	27	38,555	40,225	40,855
Type IV	31	41,86	42,935	43,725
Type V	32	43,78	45,005	45,495

TAB. 7.10 – Nombre moyen de transports sous-traités

La différence entre la borne inférieure et l'algorithme $TSAM_{Dyn}$ est en moyenne de 10 demandes sous-traitées. Cette différence s'explique par les deux dernières contraintes du modèle. Il n'est pas possible de tenir compte de certaines opérations coûteuses en temps (détour pour changer de véhicule, temps de changement de véhicule, temps de désinfecter, etc.). Cependant, notre algorithme trouve en moyenne deux demandes sous-traitées en moins, ce qui n'est pas négligeable pour l'hôpital.

Comme expliqué au début de cette section, une instance réelle a été créée. Elle contient 132 demandes de transport avec 50 demandes connues à l'avance, 6 demandes sont médicalisées, 3 sont contagieuses et 17 émanent du SAMU. Durant cette journée, 36 transports ont été sous-traités en plus des demandes réalisées en retard comparées à la définition des fenêtres de temps du problème. Nous n'avons pas été en mesure de retrouver la valeur de la fonction objectif car il manquait des informations sur les numéros d'équipes des transports assurées. Après une exécution de l'algorithme $TSAM_{Dyn}$, nous trouvons une solution avec 33 demandes sous-traitées. Cette différence de 3 demandes est un gain de l'ordre de 200 Euros pour une journée.

7.2.4 Conclusion du modèle dynamique

L'algorithme de la recherche tabou avec mémoire adaptative, modifié pour le cas dynamique en considérant toutes les contraintes du problème, permet d'obtenir des solutions de bonne qualité en un temps très raisonnable ($\approx$ 2 secondes). De plus, cette méthode présente l'avantage d'être à la fois flexible et robuste :

- flexible car elle peut être facilement adaptée pour prendre en compte des pré-affectations afin de tenir compte des choix des régulateurs,
- robuste car si la solution courante devient irréalisable suite à des nouvelles demandes critiques (comme celle du SAMU), une nouvelle solution de bonne qualité peut être rapidement retrouvée grâce aux différentes routes de la mémoire adaptative.

Enfin, parmi les autres avantages de cette méthode dynamique, elle peut être facilement adaptée pour prendre en compte d'autres types d'événements que l'arrivée de nouvelles demandes, comme la panne d'une ambulance ou l'annulation de demandes de transports.

Malheureusement, jusqu'à aujourd'hui, il n'a pas été possible de récupérer des instances réelles complètes pour tester l'algorithme et pouvoir les comparer aux choix des régulateurs (seule une instance a servi de comparaison). De plus, bien que la mise en place à la centrale de cet outil serait une aide à la décision pour les régulateurs, il n'est pas encore possible d'interconnecter l'algorithme à l'outil existant des gestions des demandes de transports : PTAH.

L'une des perspectives de l'étude pourrait être le développement d'une autre heuristique pour le cas dynamique afin d'améliorer l'évaluation de l'algorithme. La génération de colonne pourrait être une méthode très prometteuse pour ce type de problème.

7.3 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés au problème d'optimisation des tournées des ambulances auquel sont confrontés les régulateurs de la Centrale des Ambulanciers. L'étude de ce problème s'est décomposée en deux parties. Dans la première partie, le problème est abordé dans sa version statique de la manière la plus générique possible mais

avec néanmoins quelques hypothèse simplificatrices. Dans cette première approche nous avons ramené le problème d'optimisation de tournées d'ambulances à un problème proche du problème du multi-voyageur de commerce. Après une présentation d'une modélisation du problème, deux méthodes de résolution sont proposées. La première est basée sur la Programmation Linéaire en Nombres Entiers (PLNE) en utilisant certaines techniques de pré-processing et des coupes permettant d'améliorer dans certain cas le temps de résolution. La deuxième méthode de résolution est une adaptation d'une heuristique connue dans la littérature : une recherche tabou avec mémoire adaptative [82]. Les résultats expérimentaux entre ces deux méthodes ont montré les performances de l'heuristique et sa capacité à trouver des solutions de bonne qualité dans des temps acceptables.

Dans la seconde partie, le problème est étudié en considérant l'ensemble des contraintes spécifiques à la CA et sa nature dynamique. Contrairement à l'étude précédente, les demandes de transports arrivent en temps réel. Ces demandes doivent donc être affectées aux ambulances du CHRU en fonction de leurs caractéristiques mais aussi de l'état de la flotte de véhicules à l'instant t de la résolution (disponibilités, situations géographiques, etc.). De plus, le nombre d'équipes travaillant en même temps varie entre 1 et 9 en fonction de la période de la journée. Les équipes sont affectées à un véhicule de départ, mais elles peuvent en changer au cours de la journée. Les deux types de véhicules sont C (classique) et A (médicalisable) répartis sur deux dépôts. Les demandes de transports ne sont plus caractérisées par un ensemble d'équipements ou type de véhicule requis mais seulement par un type parmi les trois suivants : classique, contagieux et médicalisé. Suivant le type de transport, des actions, comme ramener le médecin ou encore désinfecter l'ambulance, sont à réaliser après le transport. Enfin, les demandes du SAMU sont modélisées par une demande classique caractérisée par un temps de réponse très court et une forte priorité. Une nouvelle modélisation d'une solution est présentée de manière à prendre en compte toutes ces nouvelles contraintes. L'heuristique mise en place pour résoudre ce problème dynamique, est une adaptation et une amélioration de l'heuristique précédente : la recherche tabou avec mémoire adaptative. Les résultats expérimentaux ont montré qu'une fois encore l'algorithme de la recherche tabou avec mémoire adaptative permet d'obtenir des solutions de bonne qualité en un temps très raisonnable. De plus, cette méthode présente l'avantage d'être à la fois flexible et robuste.

Chapitre 8

Dimensionnement et affectation des ambulanciers

Ce chapitre aborde la problématique du dimensionnement du nombre d'ambulanciers au SAMU et à la CA. Ce problème d'affectation des ambulanciers est fortement lié à l'activité aléatoire du SAMU. L'objectif est de trouver la meilleure organisation pour le CHRU de Tours en terme de coût mais aussi de qualité de transport (temps d'attente, d'envoi de secours, etc.). Ce chapitre est divisé en 4 sections. La première introduit le problème et rappelle la problématique. Puis, la deuxième section présente une étude approfondie du problème et une modélisation possible. La troisième section propose et argumente sur le choix de l'outil d'aide à la décision proposé pour résoudre ce problème : la simulation. Enfin, nous concluons et dressons un ensemble de perspectives de travail dans la dernière section.

8.1 Introduction au problème

Les deux acteurs principaux du problème sont la Centrale des Ambulanciers et le SAMU. Le premier doit répondre à toutes les demandes de transports, émanant des unités de soins, qui sont en partie prévisibles et donc planifiables. Alors que concernant le SAMU, les demandes de transports auxquelles il doit répondre sont quasiment imprévisibles et le temps de réponse doit être rapide. Pour la CA, les ressources nécessaires sont soit des ambulanciers avec les ambulances du CHRU, soit des ambulanciers et ambulances du privé. Le SAMU nécessite différents types de ressources selon le type du transport demandé. Dans la plupart des cas, des équipes SMUR sont envoyées avec leurs véhicules. Cependant pour transporter le patient, le SAMU doit en plus faire appel selon le type de transports soit aux pompiers, soit à ses ambulanciers, soit à des ambulanciers de la CA, soit à des ambulanciers du privé. Les règles d'utilisation des ressources selon le type de transports demandé seront décrites plus loin dans ce chapitre. A noter qu'actuellement le SAMU n'emploie aucun ambulancier, il en demande donc régulièrement à la CA. La ressource véhicules n'est pas une ressource critique pour ce problème, elle est donc négligée dans cette étude. Le point critique est la répartition du pool des ambulanciers du CHRU entre les deux acteurs. La figure 8.1 présente schématiquement les relations entre les acteurs et les ressources du

problème.

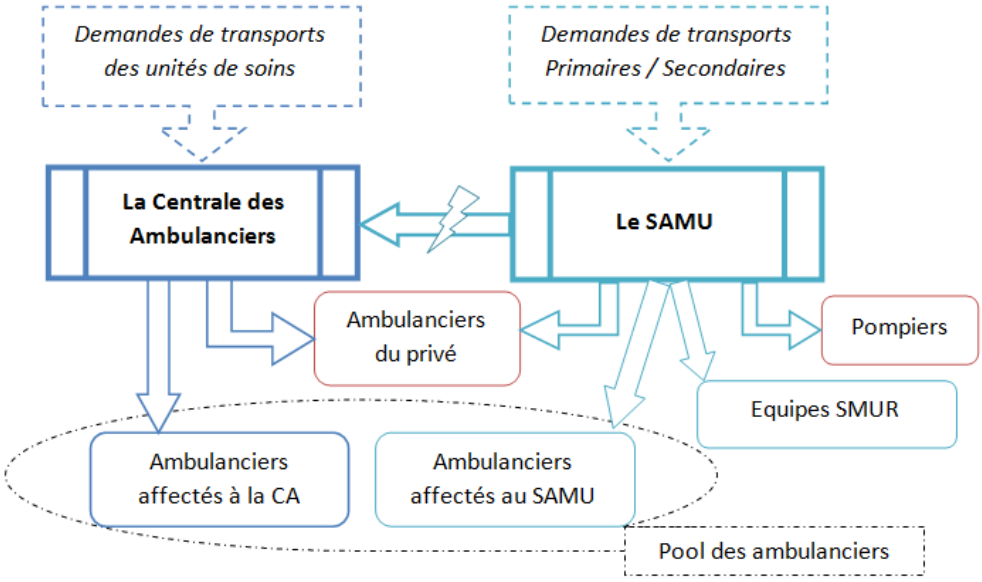


FIG. 8.1 – Acteurs et Ressources du problème de répartition des ambulanciers

Actuellement, tous les ambulanciers sont gérés par la CA. Le SAMU est donc obligé de souvent solliciter la CA pour obtenir rapidement des ambulanciers. Si des ambulanciers étaient affectés au SAMU pour répondre à ces sollicitations, le SAMU perturberait moins la CA avec ses demandes urgentes d'ambulanciers et les temps de réponses aux demandes seraient diminués. En contrepartie, réduire le nombre d'ambulancier à la CA induirait un nombre d'appels au privé plus élevé, et donc une augmentation du coût des transports du CHRU. Toutefois, le SAMU aussi réduirait les coûts de transports en diminuant les appels au privé, s'il pouvait utiliser ses propres ambulanciers. L'objectif de ce problème est donc de trouver un bon compromis entre les coûts des transports et les temps de réponses suivant la répartition des ambulanciers. Mais le dimensionnement du nombre des ambulanciers au SAMU et à la CA n'est pas simple. D'une part, cela ne se résume pas à déterminer le nombre d'ambulanciers mais aussi leurs horaires de travail, leurs périmètres d'interventions pour le SAMU (primaire et/ou secondaire), les localisations des équipes restantes à la CA (Bretonneau ou Trousseau), etc.

L'aspect aléatoire du problème n'est pas à négliger. Il est très difficile de déterminer l'heure, la durée et le type des transports à l'avance, en particulier pour le SAMU. Non seulement, ces demandes sont imprévisibles, mais les réponses doivent être immédiates et sont dictées par les circonstances. Aucune planification ni aucun ordonnancement des transports ne sont envisageables.

8.2 Etude et modélisation du problème

Dans cette section, nous allons définir et délimiter clairement le problème. Nous décrirons dans un premier temps le système constitué de la Centrale des Ambulanciers et du SAMU. Nous établirons ensuite l'ensemble des données physiques du système dans un deuxième temps. Puis, nous définirons une représentation d'une solution de ce problème de dimensionnement. Enfin, ce problème présentant un caractère fortement aléatoire, nous verrons l'ensemble des variables aléatoires du système.

8.2.1 Description du système

Suite à plusieurs visites et réunions au SAMU et à la Centrale des Ambulanciers, nous avons pu déterminer avec précision leur fonctionnement interne vis-à-vis des différentes demandes de transports (quels sont les moyens envoyés, leurs coûts, les décisions prises, etc.). Nous allons décrire dans un premier temps le fonctionnement du SAMU, puis dans un deuxième, celui de la Centrale des Ambulanciers.

8.2.1.1 Le SAMU

Le SAMU répond à deux types de demandes de transports : primaires et secondaires. La figure 8.2 présente un diagramme d'activité (UML) représentant synthétiquement le comportement du SAMU lorsqu'une nouvelle demande arrive (primaire ou secondaire). Il y a donc deux types d'interventions :

- Intervention primaire : elle consiste à aller chercher la victime sur le lieu de l'accident pour la transporter vers l'un des sites du CHRU ou un autre établissement agréé. Suite à ce type de demande, si aucun ambulancier pour une urgence primaire n'est disponible au CETRA, le SMUR (constitué d'un médecin et d'une infirmière) se rend sur place avec un VML (Véhicule Médicalisé de Liaison). La répartition des missions de rapatriement de la victime entre sapeurs pompiers et ambulanciers se fait sur des critères de lieu (voie publique ou domicile) et de pathologie (traumatologique ou non). Si un ambulancier de la centrale peut assurer le transport avec un véhicule type ambulance A de réanimation du SAMU, dite AR, la suite des opérations dépend de la distance à parcourir pour aller chercher le patient. En se basant sur une distance de référence, trois cas sont possibles :
  - le patient est proche : si un VSAV (Véhicule de Secours et d'Assistance aux Victimes) a déjà été envoyé sur place, le SMUR se rend sur place avec un VML, sinon une ambulance AR du SAMU avec une équipe SMUR est envoyée.
  - le patient est à une distance moyenne : le SMUR se rend sur place en VML.
  - le patient est loin : le SMUR se rend sur place en hélicoptère et pendant ce temps le patient sera éventuellement transporté vers le lieu d'atterrissage par un VSAV ou une ambulance privée. Au retour de l'hélicoptère au CHRU, une ambulance AR devra aller chercher le patient et le SMUR sur la piste d'atterrissage pour les emmener vers un établissement de santé.

  A noter que le cas d'un ambulancier disponible au CETRA est purement hypothétique puisqu'actuellement aucun ambulancier n'est au CETRA et les ambulanciers

de la Centrale ne font pas de transports primaires. Actuellement, le rapatriement du patient s'effectue uniquement par VSAV ou ambulance privée.
- Intervention secondaire : il s'agit du transport urgent de patients soit entre deux hôpitaux du CHRU de Tours (intra muros) soit entre un hôpital de Tours et un autre centre hospitalier extérieur (inter CH). Le cas des transports pédiatriques est inclu dans celui des transports secondaires type inter. Ces derniers peuvent nécessiter un hélicoptère, il faut alors soit récupérer le patient à la piste d'atterrissage de l'hélicoptère pour le transporter vers un hôpital du CHRU de Tours, soit l'emmener d'un hôpital de Tours vers la piste de décollage de l'hélicoptère. Dans tous les cas intra muros, inter CH et pédiatrie, il faut soit utiliser une ambulance du SAMU conduite par un ambulancier disponible au CETRA, faire appel à la Centrale des Ambulanciers pour obtenir un ou deux ambulanciers. Si aucun ambulancier n'est disponible aussi bien au CETRA qu'à la Centrale, une compagnie d'ambulances privée est appelée.

Sur la figure 8.2, chaque fin de parcours de l'arbre induit un coût pour le SAMU en plus du coût fixe de fonctionnement (frais entretien, personnel, etc.) :
- (0) : aucun coût supplémentaire hormis le coût du kilométrage,
- (1) : coût d'un appel à une ambulance privée (décrit à la section suivante),
- (2) : coût d'un appel aux sapeurs pompier (également décrit à la section suivante).

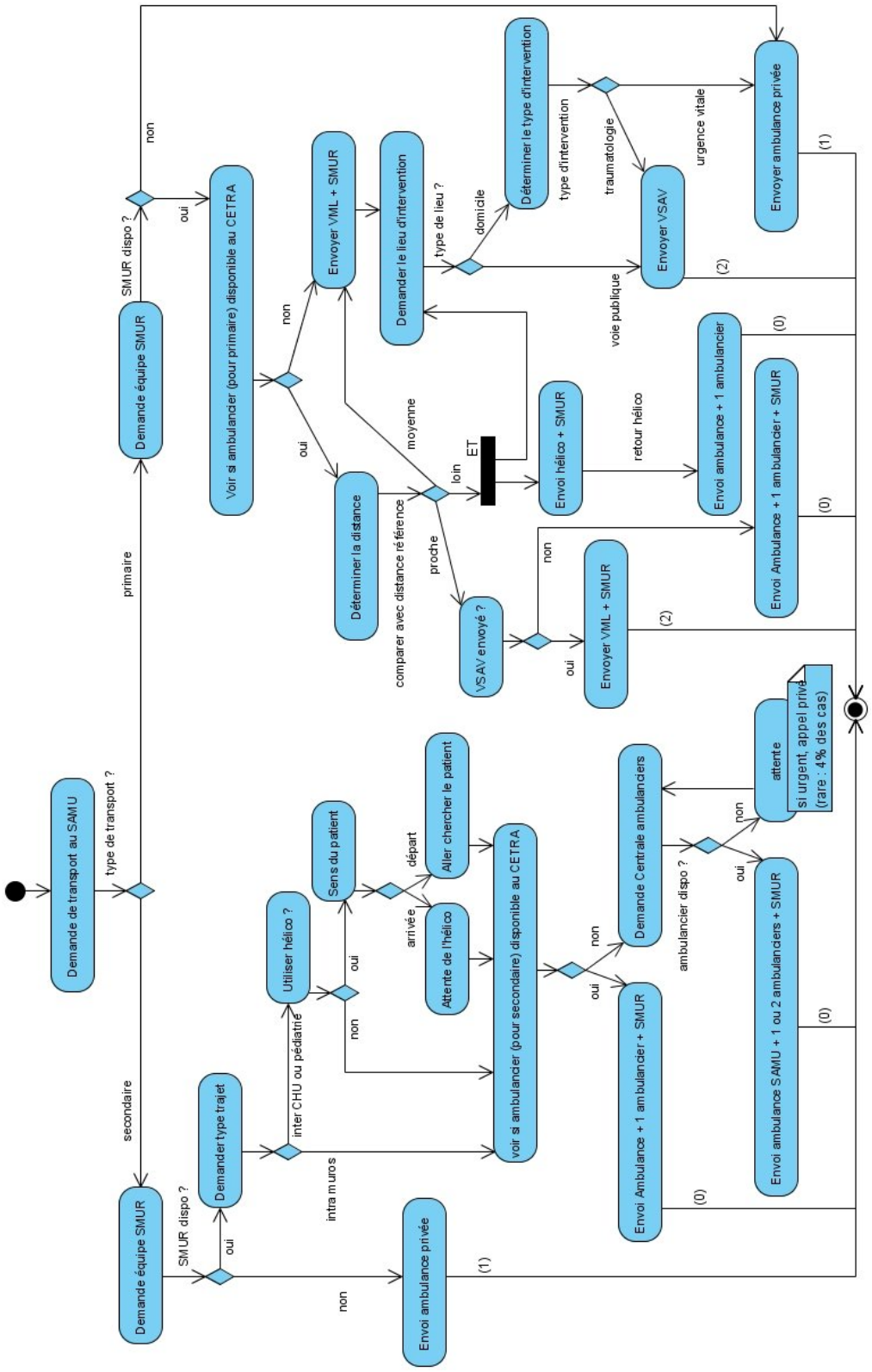


FIG. 8.2 – Diagramme d'activité du SAMU

8.2.1.2 La Centrale des Ambulanciers

La centrale des ambulanciers assure tous les transports internes au CHRU de Tours. De la même façon que pour le SAMU, la figure 8.3 présente un diagramme d'activité représentant synthétiquement le comportement de la Centrale lorsqu'une nouvelle demande arrive. A la réception d'un appel, la Centrale des Ambulanciers doit faire face à deux types de demandes, celles émanant d'un service et celles du SAMU (secondaire) :

- Si l'appel provient du SAMU, la centrale doit trouver des ambulanciers le plus rapidement possible (un ou deux). Dans ce cas, l'ambulance AR du SAMU est utilisée. S'il s'agit d'un SAMU d'un autre département (SAMU 41 par exemple), une ambulance appartenant à la Centrale est utilisée. Dans ce cas, s'il n'y a pas deux ambulanciers disponibles à la centrale, le transport est sous-traité à une ambulance privée.
- Dans le cas où la demande est faite par un service de CHRU de Tours, trois cas se distinguent : demande classique, médicalisé et contagieux (cf. les chapitres précédents). Certaines demandes peuvent être sous-traitées s'il n'y a pas assez d'ambulanciers pour effectuer tous les transports demandés.

Comme pour le SAMU, chaque fin de parcours de l'arbre de la figure 8.3 induit un coût pour la Centrale des Ambulanciers en plus du coût fixe de fonctionnement :

- (0) : aucun coût supplémentaire hormis le coût du kilométrage,
- (1) : coût d'un appel à une ambulance privée (décrit à la section suivante).

8.2.2 Les données physiques

Les données physiques du système correspondent aux données qui ne sont ni liées à la représentation d'une solution ni aléatoires dans le système. Ces données peuvent se classer en trois catégories :

- La structure de l'hôpital : le nombre de services total du CHRU de Tours, leurs répartitions dans les hôpitaux et les données de géo localisation des structures (hôpitaux, CETRA, Centrale des Ambulanciers, et la piste d'atterrissages des hélicoptères).
- Les véhicules : le nombre d'ambulances de type A et C appartenant à la centrale des ambulanciers, le nombre de VML et d'ambulances AR classiques et pédiatriques lié au SAMU, et pour chaque véhicule le lieu de départ et d'arrivé auquel il est affecté.
- Les coûts : le coût kilométrique des véhicules, les coûts d'appel au VSAV (uniquement un forfait de 105€) et les coûts d'appel aux ambulances privées (Forfait Tours = 54,08€ ; Forfait Département = 48,36€ ; et un tarif supplémentaire de 2,08€/km au delà de 5km de transport du patient).

8.2.3 Représentation d'une solution

Une solution de ce problème de dimensionnement consiste à définir l'ensemble des attributs suivants :

- Un nombre d'équipes de deux ambulanciers affectées à la Centrale, avec pour chaque équipe :
  - un horaire de travail (début, fin et pause),

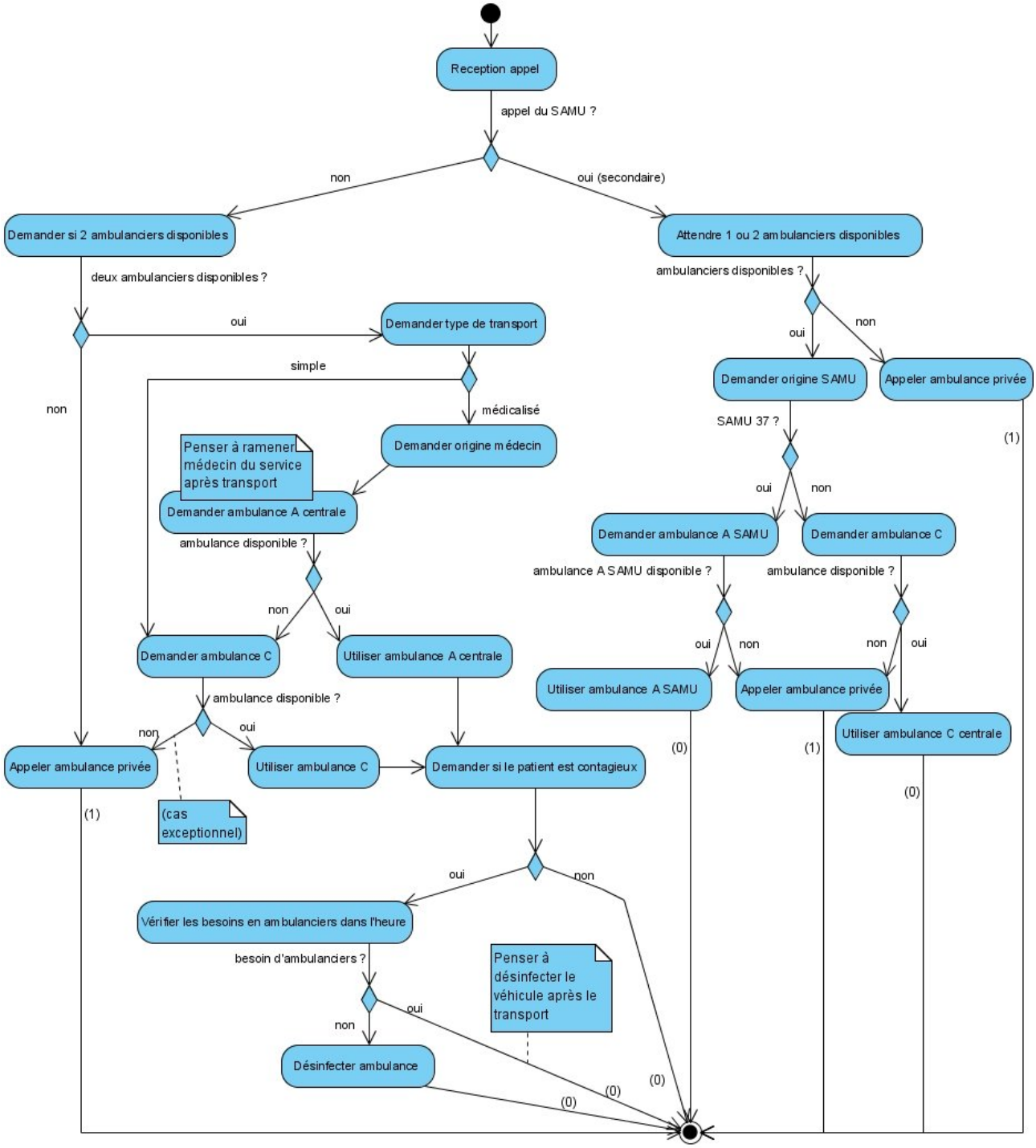


FIG. 8.3 – Diagramme d'activité de la Centrale des Ambulanciers

  - un point de départ.

- Un nombre d'ambulanciers affectés au SAMU, avec pour chaque ambulancier :
  - un horaire de travail (début, fin et pause),
  - un ensemble de missions dans lesquelles il peut intervenir ou non, parmi :
    - Transport SMUR Adulte,
    - Transport SMUR Pédiatrique,
    - Transport primaire,
    - Transport secondaire.

- Nombre d'équipes SMUR prêtes à partir pour une intervention Pédiatrique ou Adulte, avec pour chaque équipe :
  - un horaire de travail (début, fin et pause),
  - un point de départ.

- Nombre d'ambulanciers envoyé par la Centrale lors de pénurie au SAMU (1 ou 2),
- Valeurs des Distances de références pour les interventions primaires (proche, moyen et loin),
- Marge de dépassements horaires acceptables pour une équipe ambulancière à la Centrale (retard acceptable pour une équipe).

Plusieurs critères d'évaluation d'une solution sont à prendre en compte. Ces critères traduisent soit la qualité des transports (temps de réponses des interventions du SAMU et retard des demandes de transports à la Centrale), soit le coût pour le CHRU (sous-traitances aux compagnies privées, appel aux VSAV et frais kilométriques) en plus des coûts fixes de fonctionnement.

8.2.4 Les variables aléatoires du système

Le système est soumis à un ensemble d'événements aléatoires se résumant à l'apparition de demandes de transports de différents types (primaires, secondaires et liés à la Centrale). Pour les demandes de transports primaires, la première variable aléatoire est la fréquence d'apparition d'une demande de ce type (probabilité d'arrivée d'une demande du même type en fonction du temps écoulé depuis la dernière), cf. annexe C figure C.1. Ce type de demande est caractérisé par l'ensemble des variables aléatoire suivantes :

- Une durée d'intervention, cf. annexe C figure C.2.
- Une distance par rapport au lieu d'intervention afin de déterminer à quel cas appartient le transport : proche, moyen ou loin. Puis pour chaque cas, une durée totale d'intervention.
- Le type de lieu : voie publique ou domicile.
- Le type de pathologie : traumatologique ou autre.
- Et si un VSAV a déjà été envoyé.

Dans le cas d'une demande de transport secondaire, plusieurs cas, tous caractérisés par une fréquence d'apparition, doivent être distingués :

- Secondaire intra muros (cf. annexe C figure C.3), avec une probabilité de service de départ et d'arrivée ainsi qu'une durée de prise en charge du patient hors véhicule.
- Secondaire inter CH (cf. annexe C figure C.4), caractérisé par une durée de prise en charge du patient hors véhicule et divisé en deux sous-cas selon une probabilité d'utilisation d'un hélicoptère ou non :
  - Si oui, un sens doit être déterminé définissant ainsi le service de départ ou d'arrivée du patient.
  - Sinon, le patient quitte un service du CHRU de Tours pour être emmené vers un autre.
- Secondaire pédiatrique (cf. annexe C figure C.5), même si ce cas est défini par les mêmes caractéristiques que celles du cas précédent, les ressources pour le transport sont différentes (SMUR pédiatrique dédié).

Le dernier cas est lié à la Centrale des Ambulanciers. La plupart de ces demandes sont caractérisées par :
- une fréquence d'apparition,
- une heure de rendez vous (début du transport, cf. annexe C figure C.6),
- une probabilité de service de départ et d'arrivée,
- une probabilité d'être contagieux ou médicalisé,
- un type : aller simple ou aller/retour (pour un type aller/retour, un temps entre la date d'arrivée du patient au service et la date à laquelle il doit repartir est à spécifier),
- une durée de prise en charge du patient hors véhicule.

En plus de celles-ci, un type de demande est aussi à prendre en compte. Il s'agit des demandes de transports secondaires émanant d'un SAMU extérieur au 37. Seule une information sur la durée d'indisponibilité d'une équipe ambulancière pour effectuer ce transport est utile pour caractériser ce type de transport.

Enfin, l'un des derniers facteurs aléatoires du système concerne tous les temps de déplacement de ces véhicules pour effectuer ces transports.

8.3 Choix de l'outil d'aide à la décision

L'outil vers lequel nous nous dirigeons pour résoudre ce type de problème est la simulation, comme elle a été employée dans le chapitre 5. Nous menons donc le développement d'un outil pour évaluer et comparer différentes répartitions d'ambulanciers et ainsi trouver le dimensionnement convenant le mieux au CHRU.

La simulation passe par l'élaboration d'un modèle et de son utilisation expérimentale pour étudier le problème. Le modèle n'est qu'une représentation du système réel étudié, capable de reproduire son fonctionnement. Néanmoins, la simulation ne permet pas de trouver directement des solutions au problème étudié. Elle peut être vue comme une simple boîte noire qui réagit à des événements en entrée suivant le modèle défini. En sortie, elle fournit un ensemble d'indicateurs choisis judicieusement ou une visualisation graphique du résultat permettant d'observer le déroulement du système dans le temps.

Les deux entités principales de cette simulation sont la centrale des ambulanciers et le SAMU, dont les diagrammes d'états-transitions peuvent être déduits des diagrammes d'activités des figures 8.2 et 8.3. Les ressources du système sont tous les moyens nécessitant un transport de patients : les ambulanciers, les équipes SMUR, les VML, les ambulances de type A et C, les ambulances AR et l'hélicoptère. Ce sont des ressources réutilisables qui possèdent une règle commune d'utilisation et d'accès : FIFO (*First In, First Out*). Enfin, les événements sont principalement les nouvelles demandes arrivant au SAMU ou à la centrale. Leurs traitements sont résumés dans les diagrammes d'activités. Il existe cependant d'autres événements permettant la coordination entre les départs des SMUR et des ambulanciers de la centrale ainsi que ceux liés à la gestion des ressources (événement de libération d'une ressource).

Le développement de ce moteur de simulation n'est pas totalement achevé [191] et les résultats obtenus par ce simulateur ne sont pas encore interprétables. Il n'y a donc à ce jour qu'un prototype de ce simulateur.

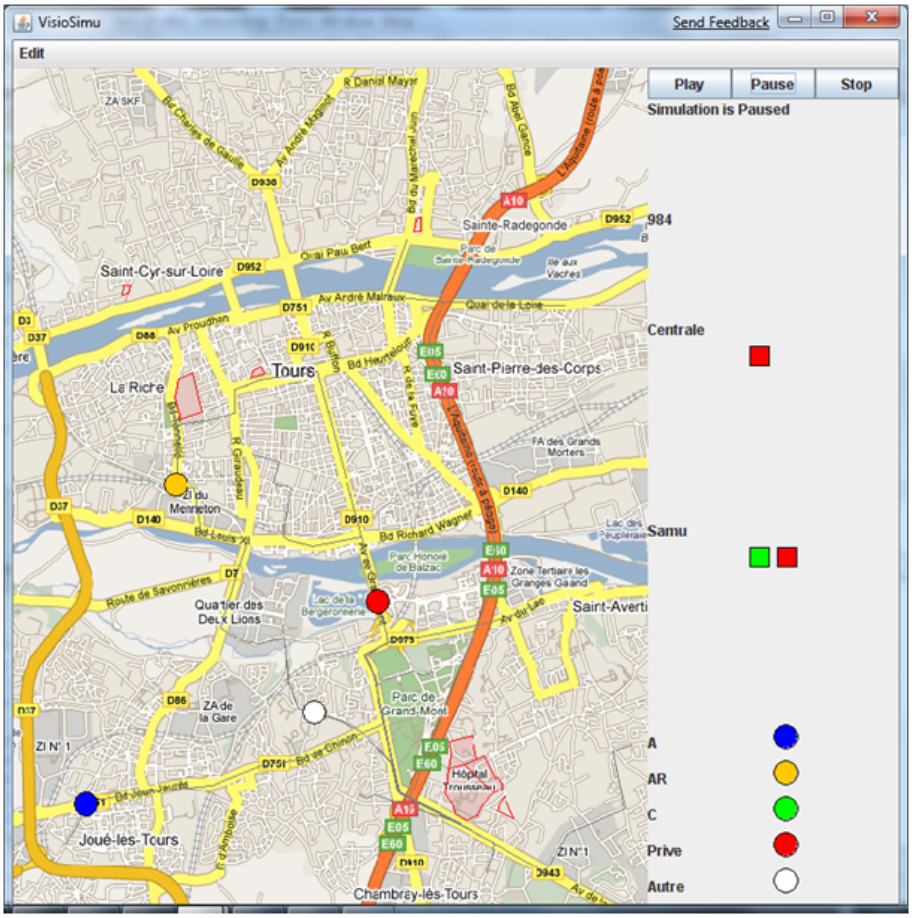


FIG. 8.4 – Prototype du simulateur

8.4 Conclusion

La problématique du dimensionnement du nombre des ambulanciers au SAMU et à la CA a été abordée dans ce chapitre. L'objectif de ce problème est de trouver la meilleure répartition des ambulanciers dans ces deux services de manière à minimiser les coûts des transports et la qualité des transports au CHRU de Tours. Ce chapitre présente une étude approfondie sur la modélisation du système constitué de la Centrale des Ambulanciers et du SAMU. Des diagrammes d'activités de ces deux services ont notamment été développés et validés par les personnes concernées. Un ensemble de données de ce système a été dégagé avec en particulier celles liées à la représentation d'une solution de répartition. Comme le système est soumis à de nombreux événements aléatoires (les différents types de demandes), une analyse sur l'ensemble des variables aléatoires du système a été réalisée. Afin de résoudre ce problème, nous proposons la simulation comme outil d'aide à la décision. Cet outil permettrait de simuler le système et de tester plusieurs solutions de répartition et d'en analyser les conséquences. Ce choix est conforté par l'état avancé de la collecte des données au SAMU sur toute une année (2008), cf. annexe C pour un aperçu graphique d'une analyse de ces données.

Conclusion générale

Les travaux de recherche développés dans cette thèse portent sur des problématiques de tournées de véhicules dans un complexe hospitalier, le CHRU de Tours. Ce CHRU est composé de plusieurs sites de soins distants dans la ville de Tours. Cette caractéristique donne lieu à une organisation importante de transports de patients et de produits entre les différents services des hôpitaux de Tours. Les principaux services concernés sont les services liés à la logistique (Blanchisserie, l'Unité Centrale de Production Alimentaire, la Logistique Hôtelière, la Pharmacie, les Archives, la Stérilisation et la Salubrité), le SAMU et la Centrale des Ambulanciers. Les travaux menés en collaboration avec ces services s'articulent autour de deux problèmes distincts : le transport de patients et les flux de matières. Nos contributions scientifiques ont été d'appliquer à ces deux problématiques des méthodes de résolution issues des techniques de la Recherche Opérationnelle.

L'étude bibliographique de cette thèse est principalement tirée de la littérature sur les tournées de véhicules et de la littérature traitant des applications de la Recherche Opérationnelle dans les systèmes de santé (conférence ORAHS, GISEH, etc.). Dans ces deux domaines, nous avons remarqué une forte augmentation en France du nombre d'études, d'articles et même de thèses. Cette augmentation devrait se poursuivre, compte tenu des enjeux économiques (réduction des coûts, économie d'échelle, etc.), politiques et sociétaux (défense du système de santé publique, soins à domicile, etc.). Au niveau de la recherche également, ces problèmes présentent un caractère attractif, non seulement en raison de leur aspect incertain (incertitudes des données, etc.) mais aussi par l'apparition de nouvelles contraintes, rendant les problèmes plus complexes que dans la littérature habituelle.

Le problème étudié dans la première partie est un problème de tournées de véhicules avec livraisons et collectes et dimensionnement du personnel. Etant tiré d'un contexte hospitalier spécifique, de nombreuses contraintes sont à prendre en compte. L'objectif du problème est de trouver une planification de tournées de véhicules sur un horizon d'une semaine ainsi que le nombre et les horaires des chauffeurs et des manutentionnaires. Le problème peut être vu sous la forme de deux problèmes de tournées de véhicules à deux niveaux qui sont interconnectés en un unique point. Le premier problème de tournées concerne les tournées des véhicules entre les différents hôpitaux de Tours et les dépôts associés à chaque flux. Le deuxième problème intervient dans un large hôpital, nommé Bretonneau, en ayant pour objectif de planifier les tournées des manutentionnaires entre les bâtiments de cet hôpital. Ce problème d'optimisation des tournées de la logistique a été abordé dans sa globalité par deux approches successives. Dans un premier temps, nous

nous sommes intéressés à ce problème de manière exploratoire et théorique, puis dans un second temps en intégrant des hypothèses émises par le service de la logistique du CHRU et d'autres contraintes, rendant le problème plus appliqué au contexte de l'étude.

Dans la première étude du problème de la logistique, nous avons commencé par développer un modèle de programmation linéaire en nombres entiers qui a permis d'identifier et de formuler clairement toutes les contraintes du problème. Cependant, les résultats expérimentaux ont montré qu'il ne peut pas résoudre des instances réelles étant donné la complexité importante du problème. Deux autres méthodes de résolution ont été alors proposées en se basant sur le même codage d'une solution : un algorithme génétique et une recherche tabou. Des résultats expérimentaux préliminaires sur ces deux méthodes ont montré que la recherche tabou est sensiblement plus performante que l'algorithme génétique. Suite à cette première étude, un ensemble de perspectives ont été établies pour améliorer ces algorithmes et prendre en compte les contraintes du problème définies au départ qui avaient été ignorées dans un premier temps, comme les durées de préparation des chariots. Toutefois, un certain nombre d'hypothèses posées au tout début de cette étude exploratoire ont été revues conjointement avec le CHRU de manière à obtenir des solutions directement applicables à la réalité. Ces considérations nous ont amené à revoir la modélisation et à proposer un modèle plus appliqué.

Dans la seconde étude du problème de la logistique, nous avons considéré l'ensemble des contraintes et hypothèses du problème afin de le rendre plus appliqué au contexte de l'étude. Les algorithmes ont été modifiés en fonction de ces nouveaux éléments et améliorés en fonction des résultats préliminaires obtenus. Nous avons proposé également un algorithme mémétique. Pour tester ces méthodes de résolution, des instances ont été générées en fonction de données réelles fournies par l'hôpital. Les résultats expérimentaux ont montré qu'appliquer l'algorithme génétique puis améliorer la meilleure solution trouvée par la recherche tabou est plus performant qu'appliquer l'algorithme mémétique, qui est pourtant une hybridation de ces deux méthodes. Cependant, des améliorations peuvent encore être apportées pour perfectionner ces différents algorithmes. L'une des améliorations les plus intéressantes serait une étude de la diversité des populations en incluant des techniques de gestion de cette diversité.

Ces méthodes de résolution permettent d'obtenir des solutions d'organisation des tournées de livraisons et de répartition du nombre de chauffeurs et de manutentionnaires à partir de données fixes. Dans le réel, plusieurs éléments peuvent varier comme les quantités des chariots de chaque demande ou les durées des trajets et des livraisons. Pour tester la robustesse des solutions face à des données stochastiques, nous avons développé un simulateur capable de tester et d'évaluer différentes organisations de la logistique du CHRU. Cette simulation à événements discrets se base sur un système représentant le modèle appliquée de ce problème de logistique. Cet outil a de plus été doté d'une interface graphique permettant d'analyser les avantages et défauts d'une solution (taux d'occupation des véhicules, temps de travail effectif des manutentionnaires, visualisation des tournées, taux d'occupation des quais, etc.). Des résultats expérimentaux ont montré qu'une des meilleures solutions trouvées par les algorithmes précédents est évaluée de la même ma-

nière que le simulateur, confirmant les résultats attendus. Enfin, ce moteur de simulation permet au travers de :

- Visualisations graphiques d'un ensemble de critères pertinents de se rendre compte des défauts d'une solution et de modifier en conséquence les méthodes de résolution,
- d'autre part, ces visualisations facilitent l'analyse des solutions par le CHRU.

Les travaux de recherche de la première partie de cette thèse consistaient donc à résoudre un problème concret de logistique par des techniques de la RO. La première difficulté fut de modéliser entièrement le problème. Contrairement à des travaux menés sur un problème théorique où les données et contraintes du problème restent constantes tout au long de l'étude, les données et contraintes des travaux menés sur un problème concret peuvent être revues à tout moment. Un codage et une implémentation générique et modulable peuvent aider à palier ce problème. Les méthodes de résolution proposées dans cette thèse sont donc dédiées à ce cas d'étude, mais peuvent être exportées vers d'autres cas similaires dans d'autres CHRU, les contraintes étant souvent les mêmes quelque soit le lieu. Enfin, même si l'intérêt scientifique de cette thèse est focalisé sur les méthodes de résolution, la simulation est un outil efficace dans un cas d'étude concret, même si elle ne permet pas de résoudre ce problème. Tout d'abord, elle a permis d'obtenir une analyse plus précise sur les solutions et d'approfondir les interprétations que l'ont peut faire pour améliorer les méthodes de résolution. Une visualisation graphique des déplacements des tournées des véhicules a autant d'avantage que, par exemple, une visualisation d'une solution d'un problème d'ordonnancement sous forme de Gantt. Enfin, cet outil a été principalement réalisé pour permettre au CHRU de tester leurs propres solutions. Mais nous nous sommes rendus compte que l'outil permet de valoriser les travaux effectués dans le cadre d'une collaboration.

Ces outils développés dans cette première partie de thèse ont été réalisés pour répondre au problème de logistique du CHRU de Tours, mais sont suffisamment génériques pour être adaptés à d'autres environnements. Ils peuvent calculer des tournées à deux niveaux sur plusieurs jours mettant en jeu plusieurs produits ou flux, une flotte hétérogène de véhicules, plusieurs dépôts, des incompatibilités entre certains flux, des véhicules dédiés ou inversement une mutualisation de certains véhicules pour certains flux, des fenêtres de livraisons préétablies, ou au contraire des jours de livraisons laissés libres, des lieux et des taux de production, des quais de tailles limités. En ce qui concerne le niveau des manutentionnaires, il faut prendre en compte des flux différents que le niveau des véhicules et on pourrait très bien adapter la méthode au cas où chaque hôpital aurait sa propre équipe de manutentionnaires, ce qu'on pourrait décrire comme un VRP à deux niveaux en étoile.

Des perspectives de ces travaux de recherche, autre que l'amélioration des méthodes de résolution, sont prévues. Tout d'abord, la collecte de toutes les données liées à la logistique de ce problème est à terminer, de manière à obtenir des instances totalement réelles. Enfin, la simulation permet d'évaluer avec précision une solution lorsqu'elle est soumise à des incertitudes. Cette évaluation pourrait être couplée avec les méthodes de résolution. Evaluer par la simulation toutes les solutions générées durant la résolution des algorithmes présentés précédemment, risquerait d'augmenter considérablement le temps de

résolution. Cependant, une évaluation par la simulation de la meilleure solution trouvée par un algorithme permettrait de déduire automatiquement certains éléments à changer dans l'algorithme, afin de relancer la résolution vers de meilleures solutions. Par exemple les éléments comme le nombre de tournées inter-hôpitaux et intra-Bretonneau se déroulant au même moment peut être changé en fonction de la charge de travail ou des retards. Ou encore, les fenêtres de temps des demandes avec un retard de livraison important peuvent être réduites de manières à tester la réaction de l'algorithme vis-à-vis de ces demandes.

La deuxième partie de cette thèse traite du problème général de transports de patients aussi bien urgents que planifiés. Les transports urgents primaires et secondaires sont gérés par le CETRA regroupant le SAMU et les pompiers. Les transports planifiés ne correspondent pas à des urgences mais à des transports prévus à l'avance de patients entre différentes unités de soins nécessitant une ambulance. Ils sont gérés par la Centrale des Ambulanciers.

La problématique majeure de la seconde partie concerne la planification des tournées d'ambulances en temps réel. L'objectif du problème est d'assurer tous les transports de patients demandés à la centrale en minimisant le coût total pour le CHRU. Certaines demandes émanent du SAMU et doivent être traitées dans les plus courts délais. Ce problème a été étudié en deux temps. Dans un premier temps, nous considérons une version statique et générique du problème. Puis, dans un second temps, le problème est étudié en considérant l'ensemble des contraintes spécifiques au contexte de l'étude et dans sa version dynamique. Pour les deux approches, une modélisation et des méthodes de résolution sont présentées. Dans la première approche, une méthode basée sur la Programmation Linéaire en Nombres Entiers en utilisant certaines techniques de pré-processing et des coupes permettant d'améliorer dans certain cas le temps de résolution, est proposée. Puis, une recherche tabou avec mémoire adaptative a été développée. Des résultats expérimentaux ont montré la performance de cette heuristique à trouver des solutions de bonne qualité pour un temps de résolution acceptable. Dans une deuxième approche où les demandes de transports arrivent en temps réel, nous avons proposé une adaptation de cet algorithme tabou, celle-ci étant assez générique pour prendre en compte les nouvelles contraintes comme les différents types de transports (classiques, médicalisés et contagieux). Les résultats expérimentaux sur des instances dynamiques ont montré qu'une fois encore l'algorithme de la recherche tabou avec mémoire adaptative permet d'obtenir des solutions de bonne qualité en un temps très raisonnable. Elle permet notamment de sous-traiter moins de demandes au privé, ce qui réduit les coûts. De plus, grâce à sa mémoire adaptative, la recherche tabou présente l'avantage d'être à la fois flexible pour prendre en compte un ensemble de pré-affectation par les régulateur et robuste face aux nouvelles demandes critiques du SAMU.

Dans cette seconde partie de thèse, nous abordons également une problématique de dimensionnement du nombre d'ambulanciers au SAMU et à la CA. L'objectif de ce problème est de trouver une répartition d'ambulanciers pour que le nombre de demandes d'ambulanciers émanant du SAMU diminue tout en gardant un effectif d'ambulanciers à la centrale suffisant pour assurer les demandes de transports planifiés. Une analyse précise du fonctionnement de ces deux services ainsi que leurs modélisations ont été proposées de

manière à concevoir un moteur de simulation permettant de tester et d'évaluer les impacts de différentes répartitions d'ambulanciers. Actuellement, un prototype de simulateur a été développé. Il nécessite pour être utilisable d'achever la collecte des données, en particulier celles manquantes au niveau des demandes de la Centrale des Ambulanciers.

Ces travaux de recherche ont permis de montrer que certains algorithmes de la littérature peuvent être adaptés pour résoudre d'autres problèmes différents et réels même si ces derniers sont plus complexes. D'autre part, dans le cas dynamique d'optimisation des transports de patients, nous nous sommes intéressés à un problème de transports assez peu étudié dans la littérature dans lequel les chauffeurs, ici les ambulanciers, peuvent changer de véhicules plusieurs fois dans une journée pour répondre aux différentes demandes. Une étude d'un problème théorique similaire à celui-ci pourrait donner lieu à des travaux de recherche innovants.

Enfin, d'autres problématiques de transports peuvent être abordées au sein d'un milieu hospitalier. Avec le CHRU de Tours, nous avons comme perspective de travailler sur la livraison des chimiothérapies dans les unités de soins de Bretonneau réparties dans différents bâtiments mais également au sein des domiciles des patients à l'extérieur des hôpitaux. De plus, ce problème paraît innovant car le calcul des tournées de livraisons doit être couplé au calcul d'ordonnancement de production de ces chimiothérapies (contraintes de stabilité des préparations chimiothérapies). En effet, depuis quelques années, nous menons un projet qui consiste à définir les spécifications et à encadrer le développement d'un logiciel d'aide à la décision, pour la planification de la production de chimiothérapies et leur traçabilité complète, depuis la prescription du médecin jusqu'à l'administration au patient (Kergosien et al. [123] et Tournamille et al. [192]). Ce travail s'est déroulé avec l'Unité de Biopharmacie Clinique Oncologique (UBCO) et nous continuons à travailler sur l'optimisation de la livraison des préparations dans les bâtiments de Bretonneau dans un premier temps.

Annexes

Annexe A

Etude complète des flux

A.1 Préambule

Cette étude de l'existant a été menée en début d'année de thèse suite à de nombreuses visites en fin d'année 2007 et début d'année 2008. Certains éléments s'y trouvant peuvent éventuellement ne plus être d'actualité. Cette étude avait donné lieu à un rapport dont voici le contenu.

A.2 Introduction

La Logistique Hospitalière du CHU de Tours est un point clé au bon fonctionnement de tous les services du CHU, regroupé sur 6 sites : Trousseau, Bretonneau, Clocheville, Ermitage, Centre Psychothérapique de Tours Sud (CPTS), et Centre Psychiatrie Universitaire (CPU). Pour avoir une idée de l'activité, le CHU de Tours soigne par an plus de 80 000 patients en hospitalisation complète (>24h) avec une durée de séjour en moyenne de 6 jours, et 100 000 patients en hospitalisation de jour (<24h). Il y a actuellement plus de 7 500 personnes travaillant au CHU, qui possède une capacité de plus de 2 000 lits et places. Chaque service émet un besoin en produits : linges, médicaments, repas, etc. La logistique du CHU a pour rôle de satisfaire tous ces besoins en temps et en heure.

Pour essayer d'améliorer la performance de tous ces flux logistiques, deux idées ont été émises par le CHU : une nouvelle planification des tournées de véhicules entre les hôpitaux, et la mise en place d'une équipe de manutention au sein d'un même hôpital : Bretonneau. L'objectif du projet est donc l'optimisation des flux logistiques du CHU de Tours et plus particulièrement ceux concernant le site de Bretonneau. L'étude porte particulièrement sur l'intérêt de créer une équipe dédiée à la manutention et une éventuelle zone de transit sur le bâtiment B2A.

Le premier objectif est de **mutualiser** et de **replanifier** les transports de produits pour gagner un maximum de temps-agent tout en gardant des tournées flexibles et robustes. Le temps-agent ainsi gagné devrait permettre la création d'une équipe de manutention sur Bretonneau afin que les transporteurs puissent livrer (uniquement) à un ou deux points seulement sur Bretonneau. Puis, la livraison des produits aux services de Bretonneau serait

assurée par une (ou plusieurs) équipe(s) de manutention. Ainsi, les véhicules effectueraient uniquement des allers-retours entre leur service et Bretonneau et ne resteront plus stationnés un long moment sur Bretonneau. Ces deux actions sont à réaliser conjointement. En effet, ces navettes influenceraient clairement la charge de travail de l'équipe de manutention sur Bretonneau, en fonction de ce qu'elle apporte et donc de ce qu'il faut livrer aux services. Ainsi, le chargement de cette navette sera fortement corrélé aux tournées que l'équipe de manutention effectuera. Enfin, si suffisamment de temps-agent est dégagé, l'équipe de manutention pourrait se voir attribuer de nouvelles missions au sein de Bretonneau visant à alléger certaines tâches du personnel de soins, et liées à la logistique.

L'idée de tester de nouvelles organisations directement sur le terrain n'est pas envisageable. C'est pourquoi la simulation paraît être un outil parfaitement adapté pour tester et analyser différentes organisations afin de décider de la meilleure.

Ce document achève une première partie du projet *flux logistique* : l'analyse et l'étude de l'existant. En préambule, un premier état des lieux a donc été réalisé pour connaître l'organisation de chaque service concerné par la logistique : les archives, la blanchisserie, le logicourses, la logistique hôtelière, la pharmacie, la salubrité, la stérilisation, l'UCPA, et les unités de soins à Bretonneau. Ce document résume le fonctionnement actuel de ces différents services en termes de flux de produits. Il présente leurs missions au sein du CHRU, leurs méthodes d'organisation, leurs contraintes, etc., mais aussi les éventuels changements possibles pour ré-organiser ces flux et créer cette équipe de manutention.

A.3 Les Archives

Les archives ont pour mission de gérer les dossiers des patients du CHRU de Tours, ainsi que quelques documents administratifs. Nous négligerons ces derniers en raisons de leur faible quantité en comparaison avec le nombre de dossiers patients. Actuellement, les dossiers patients sont conservés au *point central* à Trousseau (23km d'étagères), dans une annexe à St Avertin (6km d'étagères), et dans des stockages de proximité[1] (7km) (cf. Annexe A.12). Chaque année, plus de 2km de dossiers sont créés et seulement 600m sont détruits. Il y a un dossier par service et par patient. Lorsqu'un patient arrive dans un service plusieurs cas peuvent se produire :

- le patient n'est jamais venu dans ce service auparavant, son dossier est donc créé,
- le patient est déjà venu :
  - soit son dossier est daté de moins de deux ans et dans ce cas il se trouve encore dans l'unité de stockage de proximité (la date du dossier sera actualisée),
  - soit son dossier est daté de plus deux ans et dans ce cas il se trouve dans les archives de Trousseau, il faut donc le rapatrier.

Du point de vue du projet, deux types de tournées de véhicules sont effectués par les archives : les tournées quotidiennes et les tournées annuelles. Ces deux types de tournées transportent les dossiers dans des armoires grises en métal sous une très haute confidentialité. Cependant, il existe aussi une navette pour les dossiers à transférer en urgence. Ces demandes non prévisibles, qui doivent être justifiées par le service demandeur, sont traitées par les archives avec un véhicule qui se déplace uniquement pour ce type de demande.

[1] Stocks près des services.

Concernant les documents administratifs, ils sont enlevés annuellement comme les dossiers patients. Les documents demandés quotidiennement sont acheminés par le service courrier sous pli confidentiel.

Tournées annuelles

Ces tournées ont pour but de collecter dans les services tous les dossiers datant de plus de deux ans. Elles se déroulent sur 5 à 6 mois et récoltent plus de 1,6km linéaires de dossiers. Un véhicule emprunté aux garages du CHRU servant à récupèrer les dossiers passe une seule fois par an par unité de stockage de proximité. Cette tournée étant annuelle et particulière, elle peut être négligée dans notre étude.

Tournées quotidiennes

Chaque jour de la semaine, de nombreux dossiers sont transférés de la centrale des archives jusqu'aux stockages de proximité, et quelques uns sont rappatriés des stockages de proximité à la centrale des archives. Pour ces transferts, un véhicule, ne pouvant contenir au maximum que 5 armoires, effectue la même tournée chaque jour (le matin) :

Départ archive (8h30) $\Rightarrow$ Trousseau $\Rightarrow$ Retour archive ($\approx$9h) $\Rightarrow$ Bretonneau ($\approx$9h20) $\Rightarrow$ Clocheville ($\approx$10h15) $\Rightarrow$ Retour archive ($\approx$10h30)

Les dossiers sont triés par site et rangés dans une des armoires du site. Le premier retour aux archives présente deux avantages :

- les premiers dossiers retournés par Trousseau peuvent être traités (gain de temps non négligeable pour le personnel des archives),
- et les armoires sont complétées par des dossiers pour Bretonneau et Clocheville 'de dernière minute'. En effet, il arrive souvent que ces dossiers ont été demandés en urgence le matin même suite à des oublis. Ce retour évite d'utiliser la navette pour les dossiers urgents.

La tournée est effectuée par deux personnes. Ces personnes n'ont pas pour unique tâche de déposer et récupérer les dossiers, mais aussi de les ranger ainsi que d'effectuer un contrôle de l'unité de stockage de proximité. Ce travail nécessite donc des compétences bien spécifiques.

Enfin, pour assurer la confidentialité des dossiers, les stockages de proximité sont à accès badgé. Cette sécurité permet de contrôler les personnes qui rentrent et sortent du stockage.

Pour ce projet, cette tournée sera difficilement modulable. Au moins une personne titulaire doit obligatoirement accompagner les armoires grises pour s'occuper du chargement et du déchargement des dossiers. Seuls l'ordre et les horaires de passages dans les stockages de proximité de Bretonneau et Clocheville peuvent être changés, la contrainte étant de commencer par Trousseau pour pouvoir revenir rapidement aux archives pour les avantages déjà énoncés.

A.4 La Blanchisserie

La blanchisserie est située à Joué-lès-Tours. Elle a pour mission de ramasser le linge sale dans les différents hôpitaux du CHRU (Bretonneau, Trousseau, Clocheville, Ermitage, Centre Psychiatrique Universitaire (CPU), Centre Psychothérapeutique de Tours Sud (CPTS), etc.), de le nettoyer, sécher, plier, puis de livrer le linge propre en fonction des besoins dans chacun des services. Elle fonctionne du lundi au vendredi et lave 15 tonnes de linge en moyenne par jour. Le flux de transports de tout ce linge se divise en deux types de circuits indépendants : un pour le linge sale et un pour le linge propre (restriction obligatoire dans les hôpitaux : toujours séparer le propre du sale). Ces deux flux seront donc traités séparément.

Ressources

La Blanchisserie a à sa disposition 6 véhicules :
- 3 sont dédiés au flux de linge propre,
- 2 sont dédiés au flux de linge sale,
- et 1 est en réserve en cas de panne.

Les véhicules peuvent changer de type de flux à condition qu'ils subissent une désinfection (passage d'un spray, durée estimée à 15 min). Chaque véhicule effectue une à plusieurs tournées par jour avec à son bord un seul chauffeur/livreur (sauf un cas particulier que nous verrons plus loin).

Flux du linge sale

Le transport du linge sale s'effectue dans des chariots à l'aide de sacs de couleurs (et bacs complémentaires) avec les significations suivantes :
- sac noir ou bleu foncé : draps et alèzes ;
- sac rose : torchons, tables, toilettes, couches, taies, langes ;
- sac blanc : linge personnalisé ;
- sac gris ou vert : le linge de bloc (bloc bleu et blouses de bloc vertes) ;
- sac bleu ciel : le linge banalisé ;
- sac violet : lavettes, franges ;
- sac orange : couvertures.

Le linge est généralement pré-trié par les services et amené au point de ramassage. Le chauffeur/livreur y récupère les chariots pleins et y dépose des chariots vides. Plus de 350 chariots sont dans le réseau. Un véhicule ne peut pas contenir plus de 21 chariots.

Les points de récolte de linge sale sont les suivants (*sur un exemple de 10t de récolté*) :
- Sur Trousseau :
  - Hôpital Trousseau (*4t*), une équipe de manutention s'occupe de descendre tout le linge en un seul point, et de le trier.
  - Psy A et B (CPTS) (*0,05t*), linge pré-trié.
  - Internat (*0,05t*), linge pré-trié.
  - SAMU (*0,05t*), linge pré-trié.
  - Ecole infirmière (*0,05t*), linge pré-trié.

- Sur Bretonneau (*4,2t*) :
  - B1A, B2A, Olympe de Gouge, et B2B (Kaplan) , linge pré-trié.
  - Psy D, linge en vrac (le chauffeur passe du temps à le re-trier).
  - Lingerie (pour le prêt de linge), linge en vrac.
  - ORL, linge en vrac.
  - Pédopsychiatrie, linge en vrac.
  - Neurologiques, linge en vrac, de plus il faut noter qu'étant donné le petit stock de linge sale qu'il possède, il doit être récolté deux fois par jours.
  - Ophtalmologiques, linge en vrac.
  - Ecole sage femme, linge en vrac.
- Ermitage (*0,5t*), linge en vrac.
- Clocheville (*1t*), linge pré-trié.
- CPU, (*0,1t*), linge en vrac.

Actuellement, il existe deux types de tournées nommées Bretonneau et Trousseau qui dépendent du jour de la semaine (cyclique sur une semaine). Chaque tournée débute vers 6h et finit à 16h, avec plusieurs passages à la lingerie pour vider le véhicule. Une exception est à noter pour la tournée de Bretonneau du lundi matin qui commence à 5h, et le chauffeur est accompagné au début de la tournée par une autre personne. Cette exception se justifie par le fait qu'en début de semaine la lingerie n'a plus assez de stock en linge sale puisqu'elle a livré un maximum de services le vendredi à cause du WE. Ainsi le but de cette tournée est de récolter un maximum de linge sale pour commencer au plus vite la production et rattraper le retard accumulé lors du WE.

Même si chaque tournée possède une feuille de route indiquant précisément quand retourner à la Lingerie, dans la pratique le chauffeur chargera au maximum le véhicule et ne reviendra que lorsque le véhicule sera plein.

Ces feuilles de routes tiennent comptes des idées suivantes :
- libérer le stock des linges sales des UF (surtout pour la Neuro),
- réapprovisionner le plus rapidement possible en début de semaine pour lancer le plus tôt possible la production,
- tirer sur le linge sale en fin de semaine afin de préparer le WE et le lundi,
- avoir une bonne répartition des chariots vides et pleins.

Flux du linge propre

Le transport du linge propre s'effectue dans des armoires de 3 types (grande, moyenne, petite) ou des sacs. Les armoires peuvent être dédiées à une UF particulière ou regrouper plusieurs UF (pas plus de 3 ou 4 UF par armoire généralement).

Le linge propre doit être livré dans plus de 180 points différents par jour, sans oublier de récupérer les armoires vides. Pour assurer cette livraison, les 3 véhicules avec un seul chauffeur à bord, se partagent 10 tournées différentes journalières (voir Fig. A.1) :
- 1 véhicule pour la tournée 'Trousseau' avec 4 retours à la Lingerie ('11', '12', '13' et '14'),
- 1 véhicule pour la tournée 'Clocheville et autre' avec 3 retours à la Lingerie ('21', '22' et '23'),
- 1 véhicule pour la tournée 'Bretonneau' avec 3 retours à la Lingerie ('31', '32', et

'33').
Les horaires de retours à la Lingerie sont indiqués Fig. A.1.

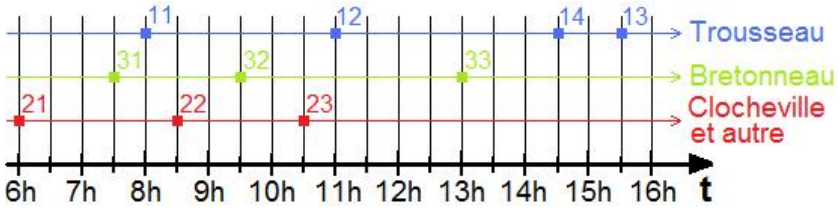


FIG. A.1 – Horaire pour le linge propre

Ces tournées ont été planifiées de sorte à réapprovisionner correctement en linge propre tous les services, et de laisser un temps de chargement de véhicule (environ 30 min) entre chaque retour d'un véhicule à la Lingerie. Ces tournées peuvent être modifiées à condition de prévenir les UFs concernées. En effet, chaque unité de soins a planifié les horaires de son personnel en tenant compte de l'arrivée du linge propre dans son service pour le ranger.

Informations manquantes

Documents à récupérer :
- Listes des tournées pour le linge sale (circuit Trousseau et Bretonneau).
- Listes des tournées pour le linge propre (les 10 tournées journalières).
- Moyennes en quantité en linge sale par type à récupérer par jour (voir par demi-journée ou heure) pour assurer la production, et donc aussi les moyennes de quantité en linge sale par type fournit par les UF par jour (voir par demi-journée ou heure).
- Moyennes en quantité en linge propre à livrer par type et pour chaque UF et les quantités en armoires équivalentes.

Questions :
- Un véhicule peut transporter 21 chariots de linge sale au maximum, combien d'armoires et de quels types peut transporter au maximum un véhicule pour le linge propre ?
- De même pour le linge sale ?

Remarque/réflexion :
- Faut-il lier la récupération du linge propre et du linge sale du point vue des quantités à collecter pour chaque type ? En effet, le schéma du flux de linge de la figure ci-dessous implique que la Lingerie peut être vue comme un client pour le linge sale avec plusieurs producteurs, et comme producteur pour le linge propre avec plusieurs clients. Les productions de linge sale sont fortement liées à la consommation du linge propre. Mais est-il utile de considérer cette dépendance pour la planification de tournées, car la planification de lavage de linge (traitement par lot et par type) s'adapte en fonction des consommations de linge propre et tire par conséquent sur le flux du linge sale.

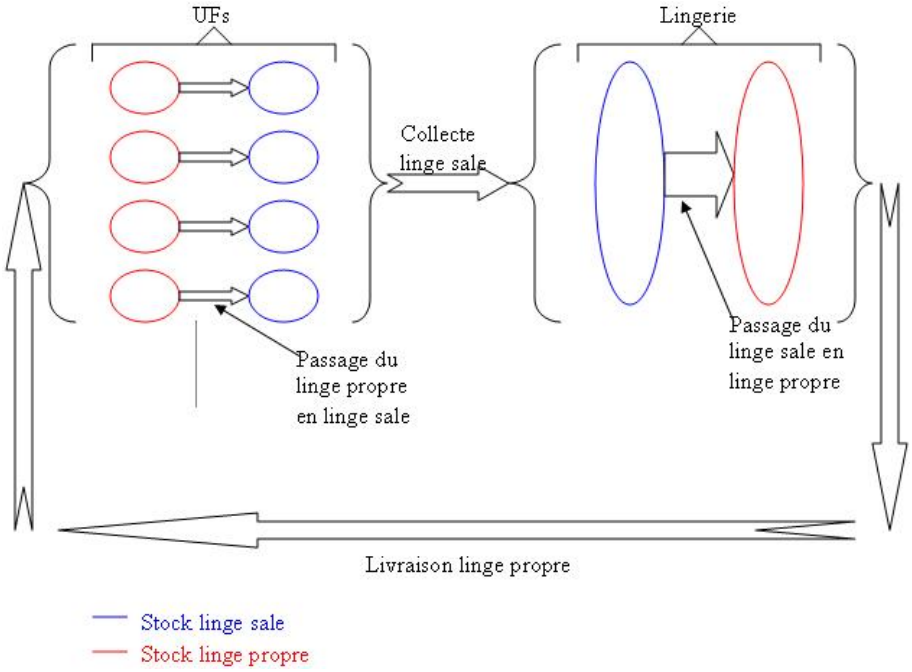


FIG. A.2 – Flux du linge

A.5 Le Logicourses

Le Logicourses a été créé dans le but de répondre aux transports de produits inter-hôpitaux et intra-Bretonneau. Les produits concernés et les lieux de livraisons sont cités en annexe A.12. Pour assurer ces transports, le Logicourses s'organise autour de deux types de tournées : les circuits planifiés et les transports à la demande.

Circuits planifiés

Les circuits planifiés permettent de transporter les produits d'une zone de transit (petite zone de stockage) vers une autre zone de transit. Ce sont les personnels des services qui viennent déposer et récupérer les produits dans les zones de transit. Ces circuits s'organisent la semaine autour de quatre tournées de véhicules, et de deux tournées le WE. L'annexe A.12 présente ces tournées de véhicules avec en ordonnée les lieux des zones de transit et en abscisse les heures de passage dans ces zones.

Ces tournées peuvent être négligées pour le projet logistique pour plusieurs raisons :
- la taille des véhicules (Kangoo) n'est pas importante, et donc non seulement la capacité est très limitée mais aussi il n'est pas encombrant,
- les livreurs ne restent pas plus de 10 min dans chaque zone de transit.

Cependant ces circuits peuvent être utiles pour des quantités faibles de produits à transporter entre les hôpitaux, comme par exemple les produits de la logistique hôtelière.

Enfin, il serait envisageable que la future équipe de manutention sur Bretonneau livre les produits de la zone de transit aux services destinataires, et inversement ramasse les

produits à déposer dans la zone de transit dans les différents services. La zone de transit de Bretonneau se situe au quai B1A.

Transport à la demande

En plus de ces circuits planifiés, Logicourses assure aussi les transports de produits à la demande. Chaque service peut effectuer une demande par téléphone pour transmettre un produit à un autre service avec une certaine priorité (ex : dossiers, organes, appareils médicaux,...). Un régulateur traite ces demandes en affectant soit le transport du produit à l'un des circuits planifiés si c'est possible, soit à l'une des personnes du Logicourses effectuant ces transports à la demande. Si aucune de ces personnes n'est disponible, le régulateur peut être amené à faire lui-même le transport, ou faire appel à une société extérieure certifiée (CHH).

Ce type de transport n'intervient pas dans le projet pour la partie flux inter-hôpitaux étant donné le caractère non prédictible des demandes. Cependant pour la partie intra-Bretonneau, l'équipe manutention pourrait se voir attribuer tous les transports de produits à la demande d'un service de Bretonneau à un autre service de Bretonneau (ex : l'échographe qui est souvent emprunté par la neurologie). Pour envisager cette charge de travail et l'évaluer par une simulation, des données sur les types de demandes sur Bretonneau devront être nécessaires. Il a été convenu d'une étude rapide visant à recueillir ces données (cf. annexe A.12). Cette collecte de données a été faite sur trois mois : mars, avril et mai 2008.

A.6 La Logistique Hôtelière

Le service de la logistique hôtelière (LH) est installé au logipôle de Trousseau. Ce service s'occupe des commandes et du réapprovisionnement de tous les produits consommés par le CHRU exceptés les produits pharmaceutiques. La LH effectue toutes les commandes nécessaires aux fournisseurs, stocke les produits livrés, prépare pour chaque UF un chariot contenant les produits commandés et termine par la livraison de ce chariot dans l'UF. Actuellement, au niveau livraison et transport, trois types de produits peuvent être distingués : en Stock, Hors Stock et Pharmacie. Ces produits sont transportés soit par chariots de deux types (chariot simple : 75x74 cm, chariot double : 100x74 cm) soit par palettes (80x120 cm).

Transport des produits de la pharmacie

La pharmacie gère ses produits à flux tendu. La livraison des produits pharmaceutiques est assurée par des chauffeurs appartenant à la LH, qui se contentent uniquement de prendre les chariots à l'entrepôt et de les déposer dans chaque UF. Au mieux, ils déchargent les chariots dans le local où les médicaments et dispositifs médicaux sont rangés par le personnel de l'UF.

Pour assurer cette livraison, deux véhicules pouvant contenir 16 chariots au maximum effectuent trois tournées 5 jours par semaine chacun (1 seul chauffeur/livreur à bord). Les

tournées actuelles sont en annexe A.12 et A.12. Les transports se font par chariots simples ou doubles et quelques palettes (seulement 4 par semaines en moyenne). La LH n'a aucune connaissance à l'avance des quantités à livrer pour chaque UF sachant que le nombre de chariots par UF est variable. Ces tournées peuvent être modifiées mais en tenant compte des points suivants :

- chaque UF dont l'horaire ou jour de livraison sera changé doit être validé par celle-ci,
- la pharmacie doit être aussi prévenue pour changer leur ordre de préparation,
- le nombre de réapprovisionnement de chaque UF et l'écart entre deux réapprovisionnements doivent être constants par semaine,
- les capacités des véhicules ne sont pas à négliger.

Les services de Clocheville s'effectuent généralement le matin. Il faut approximativement 1h30 pour assurer cette livraison en comptant l'aller/retour du véhicule. Le chauffeur se contente de déposer dans le hall les chariots, et c'est le personnel de soins qui vient les récupérer.

A l'Ermitage cela prend approximativement 2h pour livrer les UF (aller-retour compris). Il faut plus de temps que pour Clocheville car tous les étages de l'Ermitage sont desservis par deux ascenseurs. Un seul ascenseur sert à livrer les produits sur palettes (le seul à avoir la capacité de les accueillir), mais il est utilisé par toutes les personnes de l'hôpital. Un autre ascenseur sert à livrer les chariots de la Pharmacie, il est moins fréquenté mais ne peut accueillir qu'un chariot à la fois.

Nous y reviendrons à la page 212 Section A.7 pour plus de détails.

Transport des produits hôteliers en stock

Le stock de la LH contient les produits qui sont régulièrement consommés par les différentes UF. Il existe environ 650 références. D'un côté de ce stock, il y a les préparateurs et livreurs des commandes des différents UF et d'un autre côté, il y a les réapprovisionneurs de ce stock. Ces derniers remplissent l'entrepôt en fonction des consommations moyennes et actuelles de tous les UF et de l'état du stock. Chaque UF commande ses produits par un système de dotation. Étant donné qu'il n'y a qu'une livraison planifiée dans la semaine, il y a donc une seule commande par semaine possible (à prévoir deux jours avant la livraison). Ce système est basé sur l'utilisation de codes barres. Une commande donne ensuite lieu à la préparation d'un ou plusieurs chariots des produits demandés. Enfin, le lendemain les chariots sont transportés jusqu'aux UF, et ce sont les livreurs de la LH qui rangent les produits dans les réserves de chaque UF.

Pour la livraison des produits en stock, la LH a actuellement à sa disposition deux véhicules qui effectuent chacun deux circuits par jour, 5 jours par semaine. Chaque véhicule peut contenir aussi 16 chariots maximum, et une tournée d'un véhicule est toujours effectuée par deux personnes. Ils ont donc pour rôle de livrer et de ranger les produits dans les différentes réserves des UF. Les tournées actuelles sont en annexes A.12 et A.12 (les palettes sont dûes aux produits hors stock ou services techniques ou papeterie, et les mensuels sont les UF qui ne fonctionnent pas en dotation à cause de leur faible quantité de produits commandés).

Transport des produits hôteliers hors stock

Le hors stock représente les produits atypiques, les commandes spontanées de matériels très spécifiques par exemple. Ces produits sont commandés par les UF qui appellent le service des Achats pour indiquer les produits qu'ils désirent. Ce service des achats passera une commande auprès du fournisseur concerné qui sera transmise au secteur Hors-Stock via un "bon de réception" (document interne). Une fois livré par le fournisseur, le produit sera stocké une courte durée jusqu'au départ de la camionnette du service de livraison du hors stock vers l'UF concerné. La livraison du produit sera assurée jusqu'à la personne qui a commandé, et elle devra signer un bon de livraison. Les produits hors stock sont très suivis par la logistique, car il y a souvent des produits qui coûtent cher (appareil médical).

Plus de 50% du nombre des commandes traitées sont des produits verreries et réactifs pour les blocs opératoires qui ont lieu en fin et début de mois.

Enfin, il faut noter qu'étant donné la forte collaboration entre la livraison du stock et du hors stock, il arrive souvent que les deux véhicules précédents s'occupent aussi de la livraison des produits hors stock, procédé s'appliquant de plus en plus au véhicules de la pharmacie, le but étant de mutualiser au mieux les transports.

Objectifs s'appliquant directement à la LH

Une des premières mutualisations possibles est celle des produits pharmaceutiques et LH, puis éventuellement avec les produits hors stock. Ces mutualisations permettraient plus de souplesse et de flexibilité sur le chargement du véhicule par rapport à la quantité variable des chariots, et d'autant plus que les chariots des produits en stock peuvent être prêts 24h avant. De plus, les véhicules pourront toujours être remplis au maximum contrairement à ce qui est fait actuellement. Enfin, un seul chauffeur serait nécessaire pour effectuer les allers-retours Trousseau/Bretonneau, économisant ainsi du temps agent. Cependant, il resterait toujours Clocheville et l'Ermitage à desservir avec une personne supplémentaire à bord du véhicule pour aider le chauffeur à ranger les produits stockés.

Quelques données

Les fichiers 'INDICATEURS ACTIVITE 2008.xls' et 'INDICATEURS ACTIVITE 2007.xls' contiennent les données sur la quantité de chariots doubles et simples livrés en fonction du temps pour la logistique hôtelière et la pharmacie (inclut la stérilisation avec). Dans l'onglet 'Base Phie', un tableau présente la quantité de chariots par jour et par UF pour uniquement la pharmacie. Dans l'onglet 'Livraisons Phie', un tableau reprenant les données précédentes présente le nombre de chariots par mois et par UF. Enfin dans l'onglet 'Base prépa LH', un tableau regroupe le nombre de chariots par UF et par jour, cependant étant donné que ces données représentent la préparation des chariots, celles-ci ne sont livrées que le jour d'après.

A.7 La Pharmacie

La pharmacie est constituée de 4 PUI (Pharmacies à Usage Intérieur) : Trousseau (qui fait aussi office de centrale d'achat), Bretonneau, Clocheville et le service de stérilisation. Cependant 95% des produits pharmaceutiques passent par la centrale d'achat du logipôle. Puis les produits sont redistribués dans les autres PUI et les différents UF selon leur type : médicaments ou S/DM (Soluté / Dispositif médicaux). Les produits sont commandés par les différentes UF à l'aide d'une double dotation (deux casiers, deux étiquettes). La pharmacie centrale du logipôle travaille à flux tendu, et toujours à J-0 (sauf pour la première tournée du matin qui est préparée la veille).

Les produits sont transportés à l'aide de chariots simples ou doubles, comme pour la LH. A chaque livraison il y a un retour de chariots avec éventuellement des produits en retour des UF (produits excédents, mauvaises commandes,...). Certains produits sont parfois transportés à l'aide de palettes (équivalent à 2 chariots doubles), souvent à destination des services de bloc urologie, réanimation (1 à 2 palettes) et hémodialyse chronique (5 à 8 palettes).

Comme pour la LH, il y a une distinction entre les produits hors stock et en stock, cependant les produits hors stock sont inclus dans les chariots des produits en stock. Cette distinction est donc transparente du point de vue de cette étude. Enfin, une autre catégorie de livraison transparente aussi est la gestion des produits commandés en urgence (à cause d'oublis, de patients imprévus,...). Ces produits sont soit inclus dans les livraisons quotidiennes, soit transmis par le logicourses, soit traités par la LH. Pour la PUI Bretonneau et dans le cas de distribution des médicaments en urgence pendant les jours ouvrés, ce sont les coursiers des services de soins qui récupérent les médicaments à la PUI Bretonneau.

Flux des médicaments

Les médicaments ne sont pas directement livrés de la centrale aux UF mais de la centrale aux PUI et enfin aux UF. Ce flux ne correspond pas à un volume important mais à de nombreux produits. Pour cela, une livraison gérée par la Logistique Hôtelière à destination des PUI a lieu tous les jours. Puis les PUI livrent leurs UF selon leur mode de fonctionnement. Dans le cas de la PUI de Bretonneau, les médicaments sont distribués aux UF dans des bacs nommés caisse roses. Nous renvoyons à la page 220 Section A.11 pour plus de détails.

Flux des S/DM

Les S/DM sont livrés directement de la centrale aux UF pour des raisons de volume. La LH gère aussi ce transport. Ce type de flux est en faible quantité par rapport aux médicaments, mais engendre un volume plus important. Les livraisons ont lieu une fois par semaine pour les dispositifs médicaux, et de 2 à 4 fois par semaines pour les solutés en fonction des consommations de l'UF et des surfaces de stockage du service. Ce flux représent en nombre de lignes un flux estimé à 45% des lignes au total distribuées par toutes les PUI confondues et 65% des lignes distribuées par la pharmacie logipôle Trousseau.

Il faut noter aussi qu'une autre famille de solutés, les bidons de solutions acide (quantité importante d'une solution pour le fonctionnement de certaines machines), ne passe pas par la centrale de Trousseau à cause toujours du volume important à livrer. Ces livraisons arrivent par le quai B2A par un seul fournisseur (1 livraison par mois de 6 à 8 palettes). Les palettes sont transportées jusque dans le service par le coursier du service d'hémodialyse (1/2 à 3/4 d'heure de temps de traitement). Cette tâche pourrait éventuellement faire intervenir l'équipe de manutention.

Transport des produits de la pharmacie

La livraison de ces produits est assurée par des chauffeurs appartenant à la LH, qui se contentent uniquement de prendre les chariots de l'entrepôt et de les amener dans chaque UF et PUI, ils doivent décharger dans la majorité des cas les cartons et reprendre le chariot hormis quelques exceptions.

Pour assurer cette livraison, deux véhicules pouvant contenir 16 chariots au maximum effectuent trois tournées par jour de semaine chacun (1 seul chauffeur à bord). Les tournées actuelles sont en annexe A.12 et A.12. La LH n'a aucune connaissance à l'avance des quantités à livrer pour chaque UF sachant que le nombre de chariots par UF est variable. Les chariots sont donc préparés par la pharmacie qui fonctionne à flux tendus : 2h avant le départ (et la veille pour la tournée du matin à 8h).

Nous renvoyons à la page 208 Section A.6 pour plus de détails.

Le document 'PLANNING LIVRAISONS BRETONNEAU.xls' détaille le planning de livraison actuel (heure et jour de livraison par type) avec en couleur bleu les tournées qui semblent difficiles de changer. Mais ces plannings de livraison pourront être revus avec les cadres concernés.

A.8 La Salubrité

L'organisme Salubrité est situé à Bretonneau. Ce service, constitué de 14 personnes, a pour mission d'assurer toute la collecte des déchets du CHRU de Tours. Il existe 5 types de déchets qui doivent être traités séparément :

- les Déchets Ménagers et Assimilés (DMA),
- les Déchets d'Activités de Soins à Risques Infectieux (DASRI),
- les Déchets Détectés Radioactifs (DDR),
- les Déchets Dangereux (DD),
- les Déchets Industriels Banals (DIB).

Actuellement, trois tournées de véhicules assurent la collecte régulière des DMA et DASRI. Les trois autres types de déchets peuvent être négligeables pour plusieurs raisons : les DDR sont traités en même temps que les DMA ou DASRI, les quantités à ramasser sont faibles, la fréquence de leurs ramassages planifiés est 4 fois par an pour les DD ou 3 à 4 fois par mois pour les DIB, et la plupart des points de collecte sont propres au circuit salubrité (aucun autre flux logistique n'y passe). Ce document décrit les 3 types de circuits de véhicules prévus pour la collecte : le premier concerne uniquement les DMA (circuit DMA), le deuxième concerne uniquement les DASRI (circuit DASRI), et le dernier

concerne les DMA et DASRI (circuit équipes environnements) qui s'occupe aussi du linge sale sur Bretonneau.

Circuit DMA

Cette tournée est cyclique sur une semaine. Elle est effectuée tous les jours sauf le dimanche par un véhicule (une benne) avec un seul chauffeur à bord qui s'occupe de vider les conteneurs. Chaque jour le véhicule suit une liste de points de collectes qui dépend du jour de la semaine (cf. document 'Organisation des tournées de la benne OM.doc', premier tableau). La capacité du véhicule est suffisamment importante pour que le véhicule puisse faire tous les points de collectes sans retourner au dépôt pour être déchargé. Une permutation de ces points de collectes est possible tant que la nouvelle tournée respecte l'heure de départ et d'arrivée au dépôt (contrainte dû aux horaires de travail du personnel). Le nombre de fois que les points de collectes doivent être visités sont aussi à respecter. Les deux points critiques (point de collecte au même endroit que d'autres livraisons ou ramassages d'autres flux) sont B1A et Clocheville.

Circuit DASRI

Cette tournée concerne donc uniquement les DASRI. Cette tournée a aussi lieu tous les jours sauf le dimanche, par un seul chauffeur d'un véhicule particulier. Ce véhicule ressemblant à un camion traditionnel du CHRU a une hauteur de 4m avec un double étage de rangement de conteneurs. Il dessert uniquement deux points de collectes que sont Bretonneau (B1A) et Trousseau, et repart au Mans pour se décharger. Les tournées de chaque jour de la semaine excepté le dimanche sont représentées par le schéma de la figure A.3.

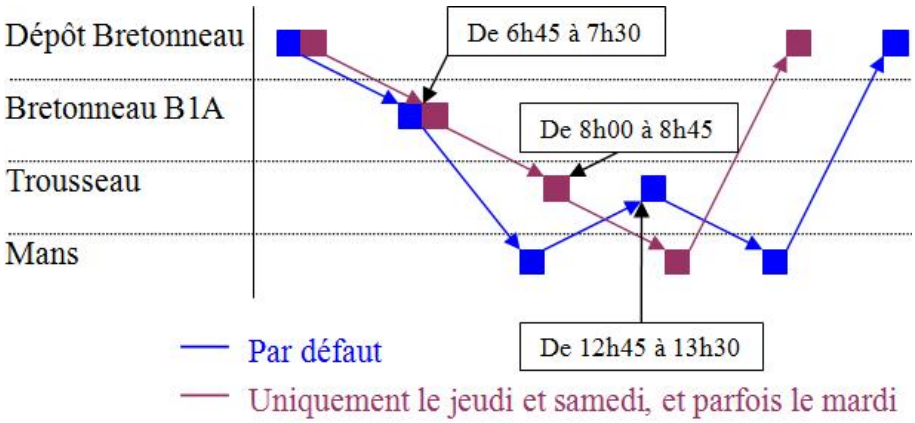


FIG. A.3 – Circuit DASRI

Circuit DMA et DASRI

Ce circuit est effectué par les équipes d'environnement de Bretonneau et de Trousseau. En résumé, leur fonction principale est de ramener tous les DASRI, ainsi que quelques

DMA, sur deux seuls points que sont B1A et Trousseau. L'équipe de Trousseau se charge uniquement de tous les services situés à Trousseau. Elle ne rentre donc pas en compte dans cette étude. Cependant l'équipe de Bretonneau intervient aussi bien au niveau de la planification de transport inter-hôpital que dans Bretonneau (future équipe de manutention). En effet, cette équipe constituée de deux personnes le matin et d'une personne l'après midi, collecte tous les DASRI et quelques DMA à l'intérieur de Bretonneau et dans quelques sites annexes à l'extérieur (Clocheville, Ermitage,...) pour les centraliser sur B1A (cf. document 'Organisation des tournées de la benne OM.doc', deuxième tableau). Les sites annexes sont effectués le matin par seulement un des deux agents avec un véhicule de 3,5 tonnes. Les agents déposent des conteneurs vides et reprennent les pleins. Avec les tournées actuelles il n'y a pas de problème de capacités. Les collectes à l'intérieur de Bretonneau se font tout au long de la journée et concernent trois sites intermédiaires entre les services et B1A comme le montre la figure A.4 (cf. document 'Synoptique des emplois du temps.doc' pour connaître la charge de travail de cette équipe sur Bretonneau).

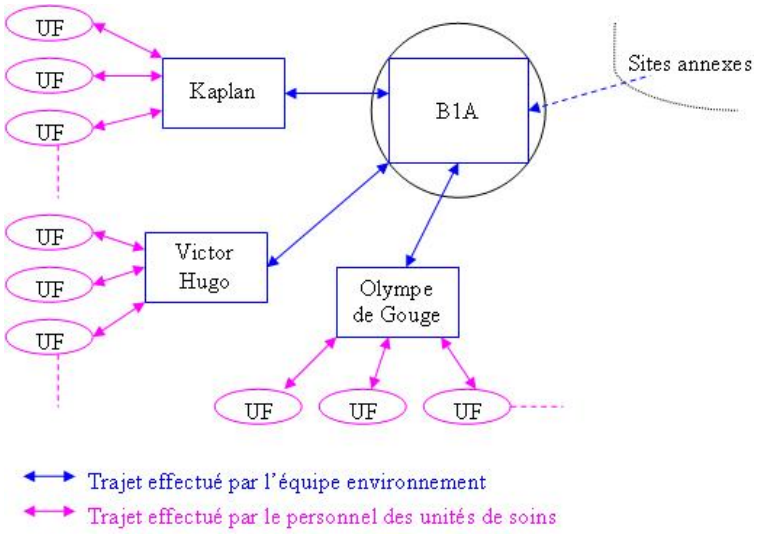


FIG. A.4 – Circuit DMA et DASRI

Les trois sites intermédiaires sont visités deux fois le matin, et deux fois l'après-midi. Cependant cette équipe n'a pas qu'une mission de transport de déchets mais aussi :

- d'assurer l'interface avec les prestataires,
- de vérifier la qualité de traitement des déchets (propreté, respect des normes, tri, contrôle,...), ce qui demande une certaine compétence et expérience à l'équipe,
- d'effectuer des transports ponctuels (non prévisibles dans le temps) dûs aux autres types de déchets (385 interventions en 2007).

A ces tâches, il faut ajouter qu'un poste donné par la Lingerie a été créé pour assurer la récolte et le tri des sacs de linge sale sur les sites de Trousseau et Clocheville. Sur Bretonneau, cette activité est intégrée au travail de l'équipe Environnement depuis l'ouverture de B1A et s'étend progressivement au fur et à mesure que s'opère la restructuration de ce site. Il faut noter que sur ce site l'évolution de cette activité se fait à moyens constants. Elle tend à simplifier le travail des chauffeurs de la Blanchisserie mais alourdit la charge de

travail de l'équipe. Il faut noter que le linge sale se transporte dans des sacs de couleurs qui sont mis dans de grands chariots au sein de Bretonneau par l'équipe (tractage par fenwick possible).

Nous pouvons souligner ici le temps perdu par le personnel des unités de soins à rapatrier les déchets et linge sale sur les sites intermédiaires. L'idée de la future équipe de manutention est de permettre aux personnels des UF de se décharger de cette tâche. Cette équipe de manutention pourrait aussi remplacer l'équipe environnement sur le trajet des sites intermédiaires et B1A, cependant elle ne pourrait pas remplacer sur B1A pour plusieurs raisons : compétence et expérience requise pour faire face aux prestataires et aux contrôles, aux demandes ponctuelles, ... Si elle devait remplacer entièrement l'équipe d'environnement, elle serait sous la direction de la salubrité ce qui ne serait pas possible politiquement. De plus, le temps-agent gagné sur l'équipe environnement ne serait pas important dû à un problème de croissance de charge de travail constaté ces dernières années (évolution des déchets triés, augmentation de la charge de travail liée au linge sale, augmentation des interventions ponctuelles, prise en charge de la gestion des cuves de décroissance des effluents radioactifs). Parmi les interventions ponctuelles, presque 400 par ans, il y a les papiers à récupérer et les enlèvements des DIB (ex : machine à laver, lits,...). Au sein des sites intermédiaires, il y a aussi l'évacuation des DD, cartouches d'impressions et cartons vers B1A à effectuer. Ce regroupement est très variable en fonction des activités des UF. De plus, à l'avenir un tri du verre, cartonnette et bouteille en plastique sera possible avec Tour(s)plus.

Les transports entre les sites intermédiaires et B1A se font par fenwick pour tous les types de déchets à l'exception des DMA pour Victor Hugo et d'une autre zone tertiaire (car la benne y passe déjà). La zone tertiaire est un autre site intermédiaire mais moins important dans l'étude car il ne concerne qu'uniquement la salubrité. Il faut noter également qu'il est possible d'accrocher des chariots déchets avec d'autres types de chariots d'autres flux, étant donné que les conteneurs peuvent être fermés hermétiquement.

L'intervention de l'équipe de manutention pourrait être telle que le montre la figure A.5.

A.9 La Stérilisation

Le service transversal de stérilisation est chargé d'assurer la stérilisation et la mise à disposition des produits stériles nécessaires à la réalisation des activités médico-techniques et cliniques des blocs opératoires, plateaux techniques, unités de soins du CHRU de Tours. Il y a actuellement deux unités de stérilisation : une à Trousseau et une autre à Bretonneau. Ce document va décrire ces deux unités uniquement d'un point de vue transport unité/UF.

L'unité de stérilisation Trousseau

L'unité de Trousseau dessert toutes les UF et blocs opératoires de Trousseau ainsi que quelques UF à Bretonneau et Clocheville. Pour Trousseau, les bacs sont transportés par des opérateurs de la stérilisation. Pour Bretonneau et Clocheville, l'unité transfère ses bacs par le logicourses grâce à ses zones de transit, et par la logistique hôtelière. Dans ce dernier

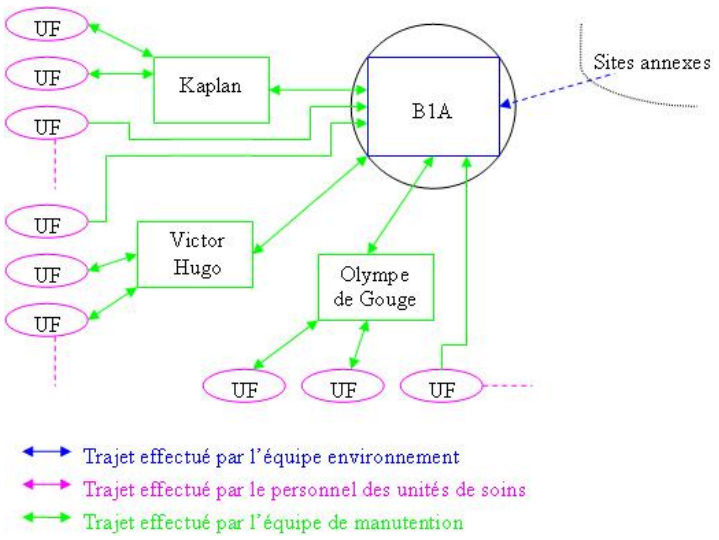


FIG. A.5 – Sites intermédiaires à Bretonneau

cas, le planning prévu à cet effet est le suivant :

Jour de cueillette par la LH	**Services concernés**	**Horaire de préparation**	**Horaire de départ de la LH**
Lundi	Oncologie USCI	17h00-21h30	Mardi 8h00
Mardi	Oncologie Clocheville	17h00-21h30	Mercredi 8h00
Mercredi	Réanimation médicale Oncologie USCI	17h00-21h30	Jeudi 8h00
Jeudi	Oncologie Clocheville	17h00-21h30	Vendredi 8h00
Vendredi	Réanimation médicale Oncologie USCI	17h00-21h30	Lundi 8h00

TAB. A.1 – Stérilisation de Trousseau

Seul le dernier cas de transport est intéressant pour le projet flux logistique, les autres cas étant transparents. Cependant dans le dernier cas, le jour de livraison et cueillette est difficilement modifiable.

L'unité de stérilisation Bretonneau

L'unité de Bretonneau s'occupe de desservir Bretonneau et Clocheville. Le transport des bacs vers les UF et les blocs opératoires est assuré par une équipe de logicourses. Cette équipe est constituée de deux personnes, une pour le matin et une autre pour l'après midi. Deux types de tournées peuvent être distinguées : celle des UF et celle des blocs.

Pour les UF, le ramassage des bacs contenant le matériel à stériliser est effectué en même temps que la livraison des bacs du matériel déjà stérilisé, l'après midi. Ces tournées

ne peuvent pas être effectuées avant 14h00 voire 15h00 car l'unité de stérilisation ne peut pas fournir avant l'ensemble des bacs des matériels devant être stérilisés. Cependant une permutation des UF, et donc un changement des horaires de livraison et ordre de livraison, est envisageable.

Enfin, pour les blocs opératoires, la cueillette des bacs a lieu le matin et la livraison ne peut être effectuée uniquement que le soir à partir de 21h15 (heure de fin de traitement des bacs des blocs). Les horaires auraient été établis par Mr Cousin de la meilleure manière possible et ne pourraient pas être modifiés.

Les informations sur la charge de travail de cette équipe, les contraintes des UF, les contraintes des blocs et de l'unité de stérilisation sont décrites dans la section A.11 page 220.

Evolution

Il faut tout de même noter que l'une des principales évolutions est de centraliser ces deux unités de stérilisation sur un seul site qui sera Trousseau dans quelques années, et donc de supprimer l'unité de stérilisation à Bretonneau.

A.10 L'UCPA

L'UCPA (Unité Centrale de Production Alimentaire) s'occupe de la production alimentaire pour fournir les repas à destination de Trousseau, Clocheville, Ermitage, Bretonneau, et quelques sites annexes. Il fournit en moyenne plus de 4500 repas par jour, et livre tous les jours de la semaine. Le transport des repas s'effectue actuellement dans des chariots à refroidissement par eau (sensiblement de la même surface qu'un chariot double), mais un projet de changer le parc des chariots est en cours. Ce chapitre décrit dans une première partie les quatre tournées actuelles de livraison, les contraintes liées à la production, les contraintes liées aux unités de soins, les contraintes liées aux chauffeurs et enfin les évolutions à venir dans le service.

Tournées actuelles

L'UCPA possède quatre véhicules pour effectuer toutes les livraisons de repas par jour. Chaque véhicule peut transporter 21 chariots au maximum. Chaque circuit par véhicule est caractérisé par :

- une liste des endroits précis de livraison : chaque circuit est effectué par un seul chauffeur (sauf pour la quatrième tournée où le chauffeur est accompagné par un aide chauffeur), c'est donc à lui seul de décharger les chariots pleins, de les emmener jusqu'à chaque service, et de ramener les chariots vides.
- un ordre de chargement : cet ordre est défini par l'ordre de livraison des services, les véhicules sont aménagés de sorte qu'il y ait trois rangées de chariots.
- des contraintes horaires : les horaires définissent l'heure de départ du véhicule, et les horaires de livraison dans chaque service.

Il faut tout de même noter que les véhicules doivent tous être désinfectés en fin de journée.

Circuit du premier véhicule

Le premier circuit est dédié aux différents selfs du personnel du CHRU de Tours. Ce circuit n'assure que les livraisons pour les repas du midi. La liste des points de livraison avec les horaires est en annexe A.12.

La quantité livrée de ce circuit est très variable, en moyenne il y a 3 chariots pour Clocheville, 2 pour l'internat de Bretonneau, 1 pour la blanchisserie, et 10 pour le self de Bretonneau. Cependant ce dernier site peut facilement varier entre 7 et 15 chariots. La quantité de chariots dépend du type d'aliments livrés (alimentation encombrante ou non). Le cas où le nombre de chariot dépasse 21 est rare, cependant lorsque c'est le cas, les chariots excédants sont dispatchés dans les autres circuits de livraison.

Circuit du deuxième véhicule

Le deuxième circuit est dédié à l'Ermitage, Clocheville et aux sites annexes. Ce circuit assure les livraisons pour les repas du midi et du soir. Il effectue deux tours pour le midi et un tour pour le soir. La liste des points de livraison, avec les horaires et les quantités de chariots, est en annexe A.12.

Circuit du troisième véhicule

Le troisième circuit est dédié aux différents services de soins de Bretonneau. Ce circuit assure les livraisons pour les repas du midi et du soir. Il effectue un tour pour le midi et un tour pour le soir. La liste des points de livraison, avec les horaires et les quantités de chariots, est en annexe A.12.

Circuit du quatrième véhicule

Le quatrième circuit est dédié aux différents services de soins de Bretonneau en complément du troisième circuit. Ce circuit assure les livraisons pour les repas du midi et du soir. Il effectue un tour pour le midi et un tour pour le soir. La liste des points de livraison, avec les horaires et les quantités de chariots, est en annexe A.12.

Contraintes liées à la production

Les contraintes liées à la production concernent le temps de chargement des véhicules. En effet, tous les véhicules ne peuvent pas être chargés au même moment. Il faut prendre en compte le temps de chargement des repas à l'intérieur des chariots, et le temps de chargement des chariots dans le véhicule. Le premier circuit est préparé à l'avance, donc il peut commencer à 7h00. Cependant, étant donné les horaires d'embauches des personnels de la cuisine, le véhicule suivant ne peut être prêt au plus tôt qu'à 8h00. Les deux derniers peuvent être prêts au plus tôt à 8h30 et 9h00. Tous les chariots pour les tournées du soir sont prêts à 13h30. Ces tournées pourraient être repoussées l'après midi et ce de façon à

livrer les chariots avant 17h30. Cependant l'amplitude horaire de travail des chauffeurs ne permet pas ce système actuellement mais pourait sans doute s'envisager dans le cas de mise en place d'un service de manutention sur Bretonneau. A noter que les chariots ont une autonomie de transport. Ils ne peuvent pas conserver les plateaux repas au delà de 3 heures après départ de l'UCPA.

Contraintes liées aux unités de soins

Tous les services de soins sont livrés par le chauffeur de l'UCPA. Une équipe de manutention sur Bretonneau permettrait d'alléger considérablement le temps que passent les deux derniers circuits sur cet hôpital. Il suffirait pour ça de livrer tous les chariots à un même endroit sur Bretonneau (B1A), puis l'équipe de manutention se chargerait de livrer ensuite aux différentes unités de soins. Ainsi, l'une des premières conséquences serait un gain en temps pour les chauffeurs des deux derniers circuits, voire la suppression d'un circuit.

Deux types de contraintes sont à respecter. La première est évidement la quantité à livrer, généralement d'un chariot par unité de soins pour Bretonneau. Il arrive rarement que cette quantité atteigne deux chariots, mais étant donné que les véhicules ne sont pas remplis au maximum, cet excès de chariots n'engendre aucun disfonctionnement. La deuxième contrainte concerne les horaires de livraisons. Toutes les unités de soins sont à livrer avant 11h30 pour le midi, et 17h30 pour le soir sauf pour 3 services (l'oncologie, l'hémodialise, et les médecines) qui sont à livrer avant 11h pour le midi, et 16h00 pour le soir. Tous les horaires de livraison ont été convenus avec le service lui-même. Il est donc impératif en cas de changement d'horaire de prévenir les services concernés.

Contraintes liées aux chauffeurs

Les chauffeurs ne peuvent pas travailler plus de 8h00 par jour avec une pause de 30 minutes le midi, soit 37h30 de temps de travail par semaine. Pour certains circuits, le temps total de livraison est inférieur à 8h00, les chauffeurs concernés retournent donc en cuisine pour aider et s'occupe aussi de la désinfection des véhicules (2 à 3h pour une personne). Cette contrainte est donc à prendre en compte pour une éventuelle mutualisation de chauffeurs entre flux (un même chauffeur pourrait livrer pour l'UCPA le matin, et l'après midi pour la logistique par exemple).

Evolution future du service

L'une des premières évolutions de l'UCPA concerne les chariots. Un budget a été accordé pour changer tout le parc des chariots à eau par une nouvelle technologie de chariots permettant d'avoir un côté chaud et un côté froid. Ce changement engendrerait quelques modifications. Tout d'abord le nombre maximum de chariots dans un véhicule ne serait plus égal à 21, et les nouveaux chariots ne pourraient plus contenir le même nombre de repas. De plus, l'autonomie des chariots serait plus restreinte. Le transport entre l'UCPA et les services soins ne devront pas excéder plus d'une heure. Enfin, ils devront être livrés 45 min avant le service des repas, temps nécessaire au réchauffement des plateaux repas.

D'autre part, l'UCPA a fait l'acquisition d'une fourgonnette réfrigérante. Actuellement, elle est utilisée pour desservir quelques hôpitaux de jour et le Cetra. Elle ne transporte pas des chariots mais uniquement des glacières, et ne peut être utilisée que pour des selfs et internats.

A.11 Eléments à inclure dans l'étude

Cette partie présente certaines particularités de Bretonneau pour l'étude du projet logistique et en particulier la création de l'équipe de manutention. La première section concerne l'équipe de stérilisation qui s'occupe du transport des matériels stérilisés ou à stériliser sur Bretonneau et Clocheville. La section suivante présente la gestion des caisses roses sur Bretonneau par une personne appartenant à la LH. Le troisième section concerne les unités de soins de Bretonneau. Et enfin la dernière section présente le 'terrain', c'est-à-dire les moyens de transports, les couloirs souterrains, les quais, etc.

Equipe Stérilisation

Cette équipe a pour objectif d'assurer les transports des bacs de stérilisation à l'aide d'armoires vers les UF et les blocs opératoires de Bretonneau et Clocheville. Pour Clocheville, l'équipe utilise un véhicule contenant jusqu'à 9 armoires avec une charge utile limitée à 800kg sachant qu'une armoire pleine peut peser jusqu'à 200Kg. Cette équipe de quatre personnes est constituée de trois postes : un du matin 5 jours sur 7 (8h30-14h30), un de l'après midi 5 jours sur 7 (14h30-22h30) et un le samedi (8h30-19h00) sachant que le reste de la semaine cette personne fait des activités au sein de la LH et de la PUI de Bretonneau pour les caisses roses.

Deux types de tournées peuvent être distinguées : celles des UF et celles des blocs. Pour les UF, le ramassage des bacs contenant le matériel à stériliser est effectué en même temps que la livraison des bacs du matériel déjà stérilisé, l'après midi. Ces tournées ne peuvent pas être effectuées avant 14h00 voire 15h00 car l'unité de stérilisation ne peut pas fournir avant l'ensemble des bacs des matériels devant être stérilisés. Cependant une permutation des UF, et donc un changement des horaires de livraison et ordre de livraison, est envisageable. Enfin pour les blocs opératoires, la cueillette des bacs a lieu plusieurs fois par jour comme pour la livraison. La dernière de ces livraisons doit être effectuée le soir à partir de 21h15 (heure de fin de traitement des bacs des blocs) (horaires établis par Mr Cousin cf. documents 'Circuits stérilisation à compter du 5 mai 2008.xls' et 'Contrat_serviceTransport_Stér2008.doc').

Pour finir, il faut noter que la plupart des matériels de stérilisation ne sont pas ordinaires, mais surtout spécifiques. Il existe donc des contraintes imposant le ramassage avant la livraison (pas de stock de matériels ordinaires pour plusieurs UF).

Les caisses roses

Les caisses roses sont des bacs de médicaments commandés par les différents UF de Bretonneau à la PUI de Bretonneau. Les personnes de cette PUI préparent ces bacs en fonction des commandes, puis soit une personne de la LH affectée à ce flux s'occupe de

la livraison dans les UF soit une personne de l'UF vient chercher sa caisse rose (cas très rare). En général, toutes les caisses roses sont gérées par cette personne ainsi que les colis encombrants ou lourds que la coursière de l'UF ne peut pas porter. Cette personne dépend du Logicourses. Les demi-journées réservées à ce flux sont : lundi, mardi, jeudi, et vendredi de 12h30 à 16h00. Depuis septembre les caisses roses se font également le mercredi pour lisser la charge d'activité de la PUI (éviter les pics le mardi et jeudi). Les livraisons du mercredi sont cependant plus rapides (UF en nombre limité et regroupées sur uniquement deux bâtiments) et allègent celles du mardi et jeudi.

Le flux des caisses roses est donc un flux de médicaments dont certains coûtent parfois très cher à l'hôpital. Tous les médicaments doivent être livrés directement et aucune caisse rose ne doit être laissée sans surveillance. De plus certains médicaments qui nécessitent une basse température pour leur conservation sont transportés dans des bacs frigorifiques, et donc leur transport ne doit pas excéder un certain temps avant réchauffement du bac.

Les tournées journalières actuelles sont organisées par secteur (≈bâtiment), avec un voire deux chariots de caisses roses par secteur. Les préparatrices et le livreur suivent un ordre de préparation/livraison définis : B1A, B2A, Olympe de Gouges, Ophtalmo, puis Neuro-Cancero.

Les unités de soins

Les unités de soins de Bretonneau constituent un élément clef de la chaîne des flux. Leurs demandes en produits de chaque flux et leurs contraintes d'horaires de livraisons peuvent influencer l'organisation future de l'équipe de manutention. De plus, l'un des objectifs du projet logistique est de permettre au personnel de soins de gagner du temps en leur retirant certaines tâches liées à la logistique grâce à l'équipe de manutention.

Suite à une réunion avec la Directrice des Soins basée sur Bretonneau, Mlle Monique Robin, nous avons convenu sur la possibilité de réunir tous les responsables des secteurs de soins de Bretonneau (de préférence le mercredi matin) avec :

- Mme Gibaud ; Cadre supérieur Sage Femme (olympe de Gouge),
- Mme Albert ; Pôle médecine Pneumologie (B1A),
- Mme Brazilier ; Cadre supérieur urologie néphrologie transplantation hémodialyse (B2A),
- Mme Kerdraon ; Cadre supérieur Bloc opératoire (B2A),
- Mme Pourain ; Pôle Cancérologie (B2B = Kaplan),
- Mme Meunier ; Pôle Tête et Cou, Ophtalmologie ORL Neurologie, Neurochirurgie (futur B3).

Ce type de réunion aurait pour but de faire remonter les attentes et les contraintes des différentes unités de soins, mais aussi de faire parvenir les différentes hypothèses de changement au niveau de la logistique afin de les faire valider par ces unités.

Environnement Bretonneau

Pour mettre au point une équipe de manutention sur Bretonneau, il est important de connaître l'environnement dans lequel cette équipe va travailler. Plusieurs types d'information sont importants à savoir : les moyens et les conditions de transports des flux, et

la cartographie de l'hôpital ainsi que ses propriétés : les points potentiels de livraison, la localisation de toutes les UF, et tous les chemins possible entre ces points.

Moyens de transport

Actuellement les transports s'effectuent par différents moyens (chariots, bacs, conteneurs,...) qui dépendent du flux considéré. Cependant la plupart des moyens 'roulants' peuvent s'attacher entre eux et donc être tractés par un fenwick ou à la main en s'aidant d'un tracteur à main. Il y a au total deux fenwick (P60) dans les souterrains de Bretonneau et un autre affecté à l'équipe environnement de la salubrité qui possède une cabine (souvent utilisée pour l'extérieur). Un fenwick ne peut tirer qu'au plus 7 éléments (contrainte réglementaire et physique). Il y a aussi un seul tracteur à main pour les quais et l'intérieur des bâtiments (mais il tombe régulièrement en panne).

Cartographie de Bretonneau

Une rencontre avec Mr COSTESEQUE Patrick a permis de définir les points et routes importants sur Bretonneau du point de vue de cette étude logistique, en particulier :

- les routes souterraines,
- les quais potentiels sachant que tout véhicule ne peut pas utiliser tous les quais pour décharger,
- les points entonnoirs : ascenseurs,
- et les zones potentielles d'entreposages.

Ces caractéristiques ont été notées sur un plan de Bretonneau : cf. document 'brNew.png'.

Temps agent

Pour calculer le nombre d'heures d'agent à affecter à la manutention (récupérés des autres flux), trois types de règles sont à prendre en compte suivant le nombre de dimanches où l'agent travail :

- Si l'agent travail plus de 20 dimanches dans l'année, il doit effectuer 1547 à 1568 heures de travail (soit 221 à 224 jours) par an.
- Si l'agent travail entre 10 et 19 dimanches dans l'année, il doit réaliser 1561 à 1582 heures de travail (soit 223 à 226 jours).
- Et si l'agent ne travaille que la semaine (type agent administratif), il doit faire dans l'année 1575 à 1596 heures (soit 225 à 228 jours).

L'intervalle en heure de travail par an est constant, et égal à 7 heures (soit 3 jours). Ces 3 jours correspondent à des jours de congés supplémentaires que peut "gagner" un agent qui fractionne suffisamment ses congés et qui les prend suffisamment en dehors de la période estivale.

A.12 Annexes

Stockage de proximité

Liste des unités de stockage de proximité avec leurs tailles (ml=mètre linéaire) :

- Bretonneau :
  - B1A (750 ml)
  - B1B (897 ml)
  - B2A (332 ml)
  - B2B (385 ml)
  - OPH (185 ml)
- Trousseau :
  - dans la tour, n° d'étage :
    - 1 (190 ml)
    - 2 (20 ml)
    - 4 (630 ml)
    - 8 (70 ml)
    - 11 (95 ml)
  - dans l'extension, n° d'étage :
    - -1 (1212.5 ml)
    - 1 Urgences (337.5 ml)
    - 2 Cardiologie (387.5 ml)
    - 3 Orthopédie (487.5 ml)
    - 3 Brûlés (18 ml)
- Clocheville : une seule (787 ml)
- Ermitage : une seule (24 ml) effectué par le Logicourse

Livraison Logicourses

Familles de produits :

- Appareils médicaux (machine à dialyse, échographe, couveuse,...),	- Pharmacie,
- Convoyage de véhicule,	- Dossier médical,
- Certificat médicaux,	- Produits Sanguins,
- Poches nutrition parentérale,	- Repro,
- Examen (gaz du sang, prélèvement frais, prise de sang, VRS,...)	- Stér,
- Matériel réparé / à réparer (lit, chaise, pied à perf, aspirateur,...)	- Stup,
- Matériel médical (Laser-diode, matériel bloc,...)	- Service du courrier,
- Autre : meubles, bureaux, passagers, colis divers, courriers urgents,...	- Organes.

Lieu de départ/arrivé de livraisons :

- Bretonneau,
- Trousseau,
- ClocheVille,
- CPTS,
- CPU,
- Ermitage.
- IFPS,
- Logipôle,
- Maison d'arrêt,
- Port Bretagne,
- Autre : cliniques de Tours, gares SNCF, domicile particulier, industriels divers,...

Circuits Logicourses

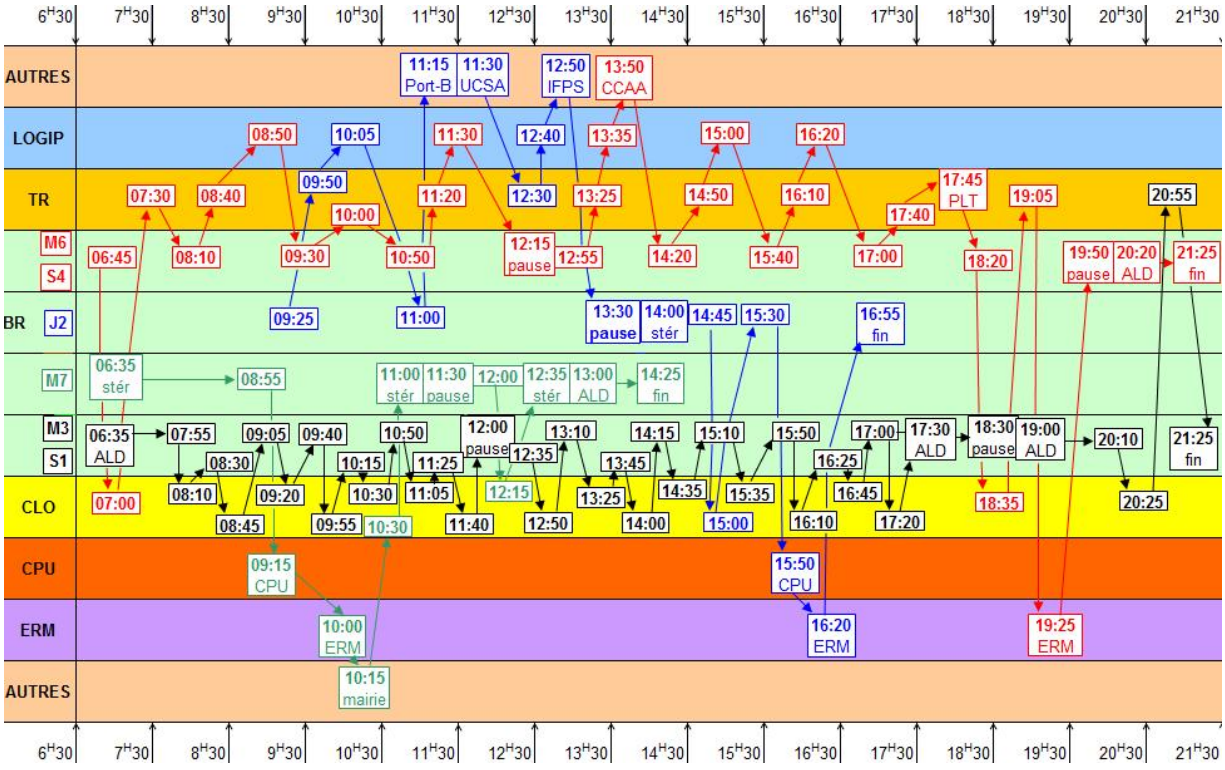


FIG. A.6 – Tournées de la semaine

Données Logicourses

Catégorie autres matériels :

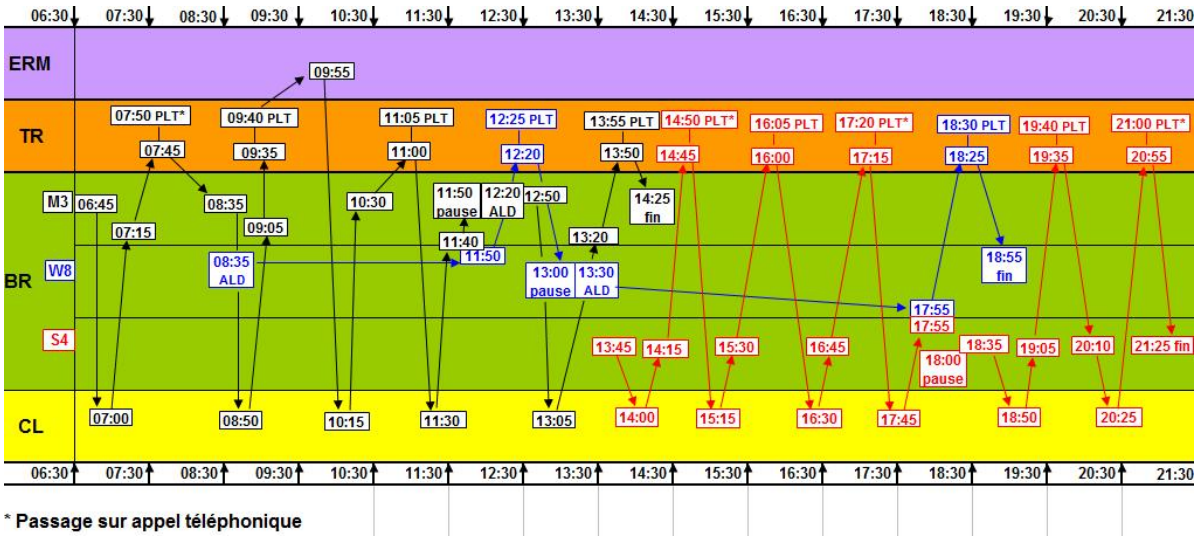


FIG. A.7 – Tournées du WE

Type de produits	Quantité	Temps moyen par livraison	Transport par camion	Transport par Kangoo	Utilisation transpal	Transport à pied
Lits	19	20’	19			
Armoires	5	25’	5		2	
Tables/chaises	8	20’	5	3	1	
Bureaux	4	20’	4		1	
Grilles	4	20’	4			
Téléphone de garde	3	10’		1		2
Colis divers	11	10’	2	7		2

Total	Délai immédiat ou < 30	Délai inférieur à 1/2 journée	Délai 24h
54	4	36	14

Unité	Départ	Arrivée
B1A	11	16
B2A	6	0
Kaplan	20	13
Corad	2	0
Hémodialyse	2	0
ODG	3	3
PSY	1	1
Uro	2	1
ORL	2	2
Neuro	2	11
EFS	0	1
Sécurité	0	1
OPHT	0	1
DPAS	1	1
Comm	1	1
Soins	1	0
Affaires médic	0	1
ODG	0	1

Catégorie appareils :

Type de produits	Quantité	Temps moyen par livraison	Transport par camion	Délai inférieur à 30 min	Délai inférieur à 1/2 journée	Délai 24h
Machines	16	20'	16	5	8	3
Echographe	7	20'	7	2	2	3
Dialyseur	9	20' (2 agents car machine peu pratique)	9	3	4	2

Unité	Départ	Arrivée
Réa	5	7
GIM	6	5
Kaplan	2	2
Batiment M	3	2
Neuro	4	2
Uro	1	0
OPHT	1	0
ORL	2	1
Biomed	2	7
Hémodialyse	1	1
EFS	5	5

Réprographie :

Unité	Départ	temps moyen par livraison
Pneumo	5	15'
OPH	5	15'
Coopé Sanitaire	4	15'
Uro	2	15'
DFI	2	15'
Neuro	3	15'
Kaplan/Corad	3	15'
Nephro	2	15'
Admissions	3	15'
RHC	1	15'
TOTAL	30	-

Matériels à réparer / réparés :

Type de produits	Quantité	Temps moyen par livraison	Transport par camion	Transport par Kangoo	Utilisation transpal	Transport à pied
Chaises, adaptables	14	10'	6	8		
Pieds à perf	9	10'	6	3		
Appareils médicaux	8	10'	3	4		1
Lits	21	20'	20			1
Chevets	6	10'	4	2		
Etuve pour génétique	2	40'	2		2	
Machine de stérilisation						
Divers	11	15'	2	4	1	1

Total	Délai immédiat ou < 30	Délai inférieur à 1/2 journée	Délai 24h
71	20	45	6

Unité	Départ	Arrivée
B1A	16	11
B2A	7	7
Kaplan	8	7
ODG	10	6
PSY	2	2
Uro	4	5
ORL	5	4
Neuro	6	7
OPHT	4	3
DFI	1	1

Ces 2 totaux ne font pas 71 car ils n'ont pas toujours noté tous les services à dépannner.

Tournée Pharmacie 1

Horaire	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
8h00	10	10	10	3000	3030
	3100	3000	1940	3030	3100
	3340	3030	3105	3110	3120
	3360	3100	3430	3120	3180
	3365	3120	3460	3190	3211
	3400	3140	3800ster	3220	3220
	3410	3180	9500		3240
	3530	3211			3340
	4110	3220			3370
	8000	3240			3400
	8010	3480			3480
		3520			3520
		3800			3550
		3825			3800
					3800Ster
					8000
					8010
10h00	1035	1100	1200	1100	1035
	1100	1102	1210	1102	1100
	1102	1200	1260	1200	1102
	1200	1210	1421	1210	6010
	1210	1411	1430	1411	6012
	1260	1421	1431	1421	
	1411	1431	1495	1430	
	1421	1480	1920NE	1431	
	1430	1490		1480	
	1431				
	1480				
	1495				
13h00	1160	1160	8000	1160	1160
	1170	1170	8010	1170	1170
	1180	1180		1180	1180
	1190	1190		1190	1190
	1355	1360		1360	1360
	1360	1362		1362	1362
	1362	1370		1380	1380
	1440	1380		1440	1440
	1460	1440		1450	1670
	1670	1460		1460	
	1730	1670		1670	
		1920uro		1920OP	

Tournée Pharmacie 2

Horaire	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
8h00	1500	1600	1800	1510	1520
	1510	1620	1810	1522	1521
	1520	1625	1820	1530	1530
	1521	1645	1844	1540	1531
	1522	3800	1860	1561	1600
	1530	5000	1870	1570	5000
	1545		1900	1572/1573	
			2680	1842	
				1924	
				1960	
10h00	1070	1070	1730	64	1200
	1072	1072	1735	1070	1210
	1072st	1072st	1740	1072	1411
	1091	1091	1830	1072ster	1421
	1095	1095		1090	1430
	1970	1923/64		1091	1431
		1970		1095	1480
				1970	1750
					1752
					1772
					1970
13h00	09/66/1910	09/66/1910	09/66/1910	09/66/1910	09/66/1910
	1020	1020	1130	1020	1020
	1042	1062	1140	1042	1042
	1062	1230	1190	1062	1062
	1230	1240	1360	1230	1230
	1240	1250	1380	1240	1240
	1240st	1280		1250	1250
	1250	1640		1280	1280
	1280	1880		1640	1640
	1640			1880	1880
	1880				

Tournée LH 1

Horaire	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
8h00	3370	106.C	106.A	76	1411
	3000	3100	632	1035	1430
	3030	3110	1020	1100	1431
	3470	3140	1042	1102	1495
	5060	3190	1062	1110	1750
	1600-1	3210	1640	1140	1752
	1600-2	3480	1880	1150	1772
	200	3520	1910	1780	
	256	3710			
13h00	940	1500/1573	22	1115	1200
	1800	1515	5000-1	8000	1210
	1844	1522	5000-2	8000.1	1220
	1850	1540	5010	8010-2	1230
	1810	1560	+	8010-3	1260
	1820	1570/1572	Palettes	8010-4	1480
	1860	1573	et		
	1870	1822/1842	mensuels		
	1900	1950/1960			

Tournée LH 2

Horaire	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
8h00	1230	1740	27	1440	3180
	1240	1735	312	1460	3240
	1250	1730	1940	1190	3350
	1280	1830	3105	1360	3410
	1380	1645	3120	1670	3430
	1355	1620	3211	1160	3450
			3220	1170	3460
			9500	1180	3550
					3800
13h00	74	1070	126	1510	6010.1
	+	1072	132	1520	6010.2
	palettes	1090	224	1521	6012
	et	1091	1090	1530.1	6060
	mensuels	1095	1955	1530.2	
		1923	1970	1531	
			1095	1545	
			+ palettes	1561	
			et mensuels	1920	

Circuit du premier véhicule UCPA

Etablissement	**Lieu de dépose du chariot**	**Interval de livraison**
Départ UCPA	-	7h00
Self et Internat de Clocheville	Dans la cuisine	7h00-8h10
Internat de Bretonneau	Dans la cuisine	7h50-8h20
Self de Bretonneau	Sur le quai de déchargement	8h00-8h40
Blanchisserie	Dans la cuisine	8h50-9h30

Circuit du deuxième véhicule UCPA

Etablissement	**Lieu de dépose du chariot**	**Interval de livraison**	**Qté de chariots**
Départ UCPA	-	8h30	-
Internat Trousseau	Dans la cuisine	8h40-9h00	2
CPTS Psy A	Dans le sous sol	8h40-9h15	3
CPTS Psy B	Dans le sous sol	8h40-9h15	2
Retour UCPA	-	-	-
Départ UCPA	-	9h30	-
Clocheville	Dans le sas de déchargement	9h30-10h15	4
Hôpital Léon Boyer	Dans le hall	9h50-10h45	1
Ermitage	Dans l'office	10h00-11h00	6
CPU	Dans le hall et dans l'office	10h45-11h45	4
Retour UCPA	-	-	-
Départ UCPA	-	13h45	-
CPTS Psy A	Dans le hall	13h45-14h00	3
CPTS Psy B	Dans le hall	13h45-14h00	2
Clocheville	Dans le sas de déchargement	14h10-15h00	4 (+1 le vendredi)
CPU	Dans le hall et dans l'office	14h40-15h40	3
Ermitage	Dans l'office	14h40-16h00	4

Circuit du troisième véhicule UCPA

Etablissement	Service	Lieu de dépose du chariot	Interval de livraison	Qté de chariots
Départ UCPA	-	-	9h00	-
Psy	Pédopsychiatrie	Dehors devant la porte	av 11h00	1
	Espace de jour Rabelais	Dehors devant la porte	av 11h00	1
B1A	Médecine interne infectieuse	4^{e} étage dans l'office	av 11h00	1
	Médecine gériatrique aigue	4^{e} étage dans l'office	av 11h00	1
	Médecine B	3^{e} étage dans l'office	av 11h00	1
	Hospi. de semaine Médecines	3^{e} étage dans l'office	av 11h00	1
	Médecine A	3^{e} étage dans l'office	av 11h00	1
	Pneumologie 1	2^{e} étage dans l'office	av 11h00	1
	Pneumologie 2	2^{e} étage dans l'office	av 11h00	1
	Réanimation 1 et 2	2^{e} étage dans l'office	av 11h00	1
	Réanimation 3	2^{e} étage dans l'office	av 11h00	1/2
	UAR : hospi de semaine	2^{e} étage dans l'office	av 11h00	1/2
	H. de jour médecines, pneumo	Rez chaussée dans l'office	av 11h00	1
B2B	Cancérologie Hospi. de jour	Rez chaussée dans l'office	10h30-11h30	1
	Oncologie - Hématologie	1^{e} étage dans l'office	10h30-11h30	1
	Oncologie - Unité stérile	1^{e} étage dans l'office	10h30-11h30	1
	CORAD	1^{e} étage dans l'office	10h30-11h30	1
B2A	Hémodialise	Rez chaussée dans l'office	10h45-11h45	1/2
	Néphro HJ	Rez chaussée dans l'office	10h45-11h45	1/2
	Urologie B	3^{e} étage dans l'office	10h45-11h45	1
	Néphrologie	3^{e} étage dans le couloir	10h45-11h45	1
	Transplantation rénale	3^{e} étage dans le couloir	10h45-11h45	1
Retour UCPA	-	-	-	-
Départ UCPA	-	-	14h00	-
B1A	Médecine interne infectieuse	4^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
	Médecine gériatrique aigue	4^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
	Médecine B	3^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
	Hospi. de semaine Médecines	3^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
	Médecine A	3^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
	Pneumologie 1	2^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
	Pneumologie 2	2^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
	Réanimation 1 et 2	2^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
	Réanimation 3	2^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1/2
	UAR : hospi de semaine	2^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1/2
	H. de jour médecines, pneumo	Rez chaussée dans l'office	14h15-16h00	1
B2B	Oncologie - Hématologie	1^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
	Oncologie - Unité stérile	1^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
	CORAD	1^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
B2A	Hémodialise	Rez chaussée dans l'office	14h15-16h00	1
	Urologie B	3^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
	Néphrologie	3^{e} étage dans le couloir	14h15-16h00	1
	Transplantation rénale	3^{e} étage dans le couloir	14h15-16h00	1

Circuit du quatrième véhicule UCPA

Etablissement	**Service**	**Lieu de dépose du chariot**	**Interval de livraison**	**Qté de chariots**
Départ UCPA	-	-	9h30	-
Neuro/ORL/Opht.	Neurochirurgie Cl. Vincent	1^{e} étage dans l'office	9h50-10h40	1
	Neurochirurgie Cushing	1^{e} étage dans l'office	9h50-10h40	1
	Neurologie Babinski	Rez chaussée dans l'office	9h50-10h40	1
	Neurologie Charcot	Rez chaussée dans l'office	9h50-10h40	1
	ORL	1^{e} étage dans l'office	9h50-10h40	1
	Ophtalmologie	1^{e} étage dans l'office	9h50-10h40	1
B1B	FIV Hospi. de jour	Rez chaussée dans l'office	10h30-11h10	1/2
	Orthogénie Hospi. de jour	Rez chaussée dans l'office	10h30-11h10	1/2
	Grossesses pathologiques	1^{e} étage dans l'office	10h30-11h10	1
	Obstétrique B	2^{e} étage dans l'office	10h30-11h10	1
	Obstétrique A	2^{e} étage dans l'office	10h30-11h10	1
	Gynécologie	3^{e} étage dans l'office	10h30-11h10	1
Psy D	Baudelaire	Dans le couloir devant l'office	10h50-11h30	1
	Ronsard	Dans le couloir devant l'office	10h50-11h30	1
	Gauguin	Dans le couloir devant l'office	10h50-11h30	1
Retour UCPA	-	-	-	-
Départ UCPA	-	-	14h00	-
Psy D	Baudelaire	Dans le couloir devant l'office	14h15-16h00	1
	Ronsard	Dans le couloir devant l'office	14h15-16h00	1
	Gauguin	Dans le couloir devant l'office	14h15-16h00	1
B1B	Grossesses pathologiques	1^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
	Obstétrique B	2^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
	Obstétrique A	2^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
	Gynécologie	3^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
Neuro/ORL/Opht.	Neurochirurgie Cl. Vincent	1^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
	Neurochirurgie Cushing	1^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
	Neurologie Babinski	Rez chaussée dans l'office	14h15-16h00	1
	Neurologie Charcot	Rez chaussée dans l'office	14h15-16h00	1
	ORL	1^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1
	Ophtalmologie	1^{e} étage dans l'office	14h15-16h00	1

Annexe B

Répertoire de problèmes d'optimisation de tournées

Le Tableau suivant dresse une liste non exhaustive des principaux problèmes d'optimisation de tournées en général. La première partie du tableau expose les problèmes liés à des tournées sur arcs et la seconde partie porte sur les problèmes de tournées sur noeuds. Chaque problème cité dans ce tableau peut être décliné sous plusieurs formes en considérant des fenêtres de temps, le cas statique ou dynamique, un graphe symétrique ou asymétrique, différentes fonctions objectifs, etc.

Désignation	**Graphe**	**Véhicule**		**Demande**		**Note**	**Référence de base**
		Nb	**Spécifité**	**Nb**	**Spécificité**		
Undirected Chinese Postman Problem	Connexe et non orienté	1	-	0	-	Trouver un cycle passant au moins une fois par toutes les arêtes (Polynomial)	Guan [92]
Directed Chinese Postman Problem	Fortement connexe et orienté	1	-	0	-	Trouver un circuit passant au moins une fois par tous les arcs (Polynomial)	Edmonds et Johnson [67]
Mixed Chinese Postman Problem	Fortement connexe avec arcs et arêtes	1	-	0	-	Trouver un circuit passant au moins une fois par tous les arcs/arêtes (NP-difficile, réduction 3-SAT [156])	Edmonds et Johnson [67]
Generalized Chinese Postman Problem	Connexe, non orienté, arêtes partitionnées en n ensembles disjoints	1	-	0	-	Trouver un circuit passant au moins une fois par une arête de chaque sous-ensemble (NP-difficile [60])	Dror et Haouari [60]
Undirected Capacity Chinese Postman Problem	Connexe, non orienté, 1 sommet dépôt	1	Capacité Q	1	Demande positive sur chaque arête	Trouver un ensemble de circuits passant au moins une fois par toutes les arêtes (NP-difficile [34])	Golden et Wong [90]
Mixed k-Chinese Postman Problem	Fortement connexe avec arcs et arêtes, 1 sommet dépôt	k	-	0	-	Trouver k circuits passant au moins une fois par tous les arcs/arêtes (NP-difficile, généralisation du Mixed Chinese Postman Problem)	Pearn [158]
Undirected Hierarchical Chinese Postman Problem	Connexe, non orienté, relations de précédences entre plusieurs sous ensemble d'arête	1	-	0	-	Trouver un cycle passant au moins une fois par toutes les arêtes en respectant les précédences (NP-difficile [62])	Dror et al. [62]
Undirected Rural Postman Problem	Connexe, non orienté, un sous ensemble d'arêtes E	1	-	0	-	Trouver un circuit passant au moins une fois par toutes les arêtes de E (NP-difficile [134])	Orloff [155]
Directed Rural Postman Problem	Connexe, orienté, un sous ensemble d'arcs A	1	-	0	-	Trouver un circuit passant au moins une fois par tous les arcs de A (NP-difficile [35])	Christofides et al. [35]
Mixed Rural Postman Problem	Connexe, mixte, un sous ensemble d'arcs A et d'arêtes E	1	-	0	-	Trouver un circuit passant au moins une fois par tous les arcs de A et toutes arêtes de E (NP-difficile, généralisation des deux cas précédents)	Romero [169]

Désignation	**Graphe**	**Véhicule**		**Demande**		**Note**	**Référence de base**
		Nb	**Spécificité**	**Nb**	**Spécificité**		
Rural Postman Problem with Deadline classes	Connexe, non orienté, 1 sommet dépôt, un sous-ensemble d'arêtes E tel que chaque arête i soit servie au temps t_i	1	-	0	-	Trouver un circuit passant au moins une fois par toutes les arêtes de E (NP-difficile, généralisation du Undirected Rural Postman Problem)	Letchford et Eglese [135]
Directed Clustered Rural Postman Problem	Fortement connexe, orienté, un sous-ensemble d'arcs A partitionné en plusieurs sous-ensembles A_i	1	-	0	-	Trouver un circuit passant au moins une fois par tous les arcs de A sachant que tout arc d'un ensemble A_i doit être visité avant tout arc d'un autre ensemble (NP-difficile, généralisation du Directed Rural Postman Problem)	Dror and Langevin [61]
Windy Postman Problem	Connexe, non orienté, Poids non symétrique	1	-	0	-	Trouver un circuit passant au moins une fois par toutes les arêtes (NP-difficile, généralisation du Mixed Chinese Postman Problem)	Minieka [146]
Stacker Crane Problem	Fortement connexe, mixte	1	-	0	-	Trouver un circuit passant au moins une fois par tous les arcs (NP-difficile, [77])	Frederickson et al. [77]
Capacity Arc Routing Problem	Connexe, non orienté, un sous-ensemble d'arêtes E, 1 sommet dépôt	k	Capacité Q	1	Demande positive sur chaque arête	Trouver un ensemble de k circuits passant au moins une fois par toutes les arêtes de E (NP-difficile, généralisation du Undirected Capacity Chinese Postman Problem)	Golden et Wong [90]
Mixed Arc Routing Problem	Connexe, non orienté, un sous-ensemble d'arêtes E et d'arcs A, 1 sommet dépôt	k	Capacité Q	1	Demande positive sur chaque arête	Trouver un ensemble de k circuits passant au moins une fois par arête de E et arc de A (NP-difficile, généralisation du Capacity Arc Routing Problem)	Belenguer et al. [14]

Désignation	**Graphe**	**Véhicule**		**Demande**		**Note**	**Référence de base**
		Nb	**Spécificité**	**Nb**	**Spécificité**		
Split Capacity Arc Routing Problem	Connexe, non orienté, un sous-ensemble d'arêtes E, 1 sommet dépôt	k	Capacité Q	1	Demande positive sur chaque arête qui peut être traitée par plusieurs véhicules	Trouver un ensemble de k circuits passant au moins une fois par toutes les arêtes de E (NP-difficile, généralisation du Capacity Arc Routing Problem)	Mullaseril et al [151]
Periodic Arc Routing Problem	Connexe, non orienté, un sous-ensemble d'arêtes E, 1 sommet dépôt	k	Capacité Q	1	Demande positive sur chaque arête par période et une fréquence de traitement	Trouver une affectation des jours de traitement pour chaque demande, et résoudre un *Capacity Arc Routing Problem* par période (NP-difficile, généralisation du Capacity Arc Routing Problem)	Chu et al. [36]
TSP	Non orienté ou orienté	1	-	0	-	Trouver un circuit ou cycle hamiltonien (NP-difficile, [106])	Dantzig et al. [50]
TSP with multiple visits	Non orienté ou orienté	1	-	0	-	Trouver un circuit ou cycle passant au moins une fois par tous les sommets (NP-difficile, [1])	Ahuja et al. [1]
Clustered TSP	Non orienté ou orienté, un ensemble de sommets partitionnés en n ensembles	1	-	0	-	Trouver un circuit ou cycle hamiltonien tel que chaque sommet d'un sous-ensemble soit visité avant de passer à un autre ensemble (NP-difficile, généralisation du TSP)	Jongens and Volgenant [107]
Generalized TSP	Non orienté ou orienté, un ensemble de sommets partitionnés en n ensembles	1	-	0	-	Trouver un circuit ou cycle passant par un sommet de chaque ensemble (NP-difficile, généralisation du TSP)	Noon [152]
m-TSP	Non orienté ou orienté	k	-	0	-	Trouver un ensemble de circuits ou cycles tel que chaque sommet soit visité exactement une seule fois (NP-difficile, généralisation du TSP)	Rao [165]

Désignation	**Graphe**	**Véhicule**		**Demande**		**Note**	**Référence de base**
		Nb	**Spécificité**	**Nb**	**Spécificité**		
Selective TSP or TSP with Profits	Non orienté ou orienté, un poids sur chaque sommet	1	-	0	-	Trouver un circuit ou cycle tel que chaque sommet soit visité au plus une fois en tenant compte de deux critères : la somme des poids des sommets visités et la distance totale parcourue (NP-difficile, généralisation du TSP)	Gendreau et al. [84] Feillet et al. [69]
Precedence Constrained TSP	Non orienté ou orienté, un ensemble de précédence entre sommet	1	-	0	-	Trouver un circuit ou cycle hamiltonien en respectant les précédences (NP-difficile, généralisation du TSP)	Balas et al. [10]
k-Peripatetic TSP	Non orienté ou orienté	k	-	0	-	Trouver k circuits ou cycles hamiltoniens et disjoints (NP-difficile, généralisation du TSP)	Kort [53]
Swapping Problem	Non orienté	1	Capacité unitaire	p	Chaque sommet ne demande qu'une unité d'un seul type de marchandise et ne fournit qu'une unité d'un seul type	Trouver un circuit passant au moins une fois par tous les sommets de manière à satisfaire toutes les demandes (NP-difficile, généralisation du Stacker Crane Problem)	Anily et Hassin [5]
One commodity pickup and delivery TSP	Non orienté, 1 sommet dépôt D, 2 ensembles de sommets disjoints (pickup et delivery)	1	Capacité Q	1	-	Trouver un circuit tel que chaque client soit livré ou collecté	Hernández-Pérez and Salazar-González [97]
Vehicle Routing Problem	Non orienté, 1 sommet dépôt D	k	Capacité Q	1	Demande positive	Trouver k circuits tels que chaque client soit livré	Dantzig et al. [51]
Split Delivery Vehicle Routing Problem	Non orienté, 1 sommet dépôt D	k	Capacité Q	1	Demande positive	Trouver k circuits tels que chaque client soit livré sachant qu'il peut être livré en plusieurs fois	Dror et Trudeau [62]

Désignation	**Graphe**	**Véhicule**		**Demande**		**Note**	**Référence de base**
		Nb	**Spécificité**	**Nb**	**Spécificité**		
Vehicle routing problem with simultaneous Pickups and Deliveries	Non orienté, 1 sommet dépôt D, 3 ensembles de sommets disjoints (pickup, delivery, et les 2 à la fois)	k	Capacité Q	2	-	Trouver k circuits tels que chaque client soit livré ou collecté	Anily [4]
TSP with backhauls	Non orienté, 1 sommet dépôt D, 2 ensembles de sommets disjoints (pickup et delivery)	1	Capacité Q	2	-	Trouver un circuit qui passe d'abord par tous les sommets pickup puis les sommets delivery	Gendreau et al. [83]
TSP with pickups and deliveries	Non orienté, 1 sommet dépôt D, 2 ensembles de sommets disjoints (pickup et delivery)	1	Capacité Q	2	-	Trouver un circuit tel que chaque client soit livré ou collecté	Mosheiov [150]
Vehicle routing problem with backhauls	Non orienté, 1 sommet dépôt D, 2 ensembles de sommets disjoints (pickup et delivery)	k	Capacité Q	2	-	Trouver k circuits qui passent d'abord par tous les sommets pickup puis les sommets delivery	Deif et Bodin [54]
The single vehicle routing problem with pickups and deliveries	Non orienté, 1 sommet dépôt D, 2 ensembles de sommets disjoints (pickup et delivery)	1	Capacité Q	p	Chaque sommet n'a qu'un seul type de marchandise fournit et demandé, et une marchandise n'a qu'un sommet de départ et de destination	Trouver un circuit qui satisfait toutes les demandes	Stein [182]

Désignation	**Graphe**	**Véhicule**		**Demande**		**Note**	**Référence de base**
		Nb	**Spécificité**	**Nb**	**Spécificité**		
The multi vehicle routing problem with pickups and deliveries	Non orienté, 1 sommet dépôt D, 2 ensembles de sommets disjoints (pickup et delivery)	k	Capacité Q	p	Chaque sommet n'a qu'un seul type de marchandise fournit et demandé, et une marchandise n'a qu'un sommet de départ et de destination	Trouver k circuits qui satisfaient toutes les demandes	Dumas et al. [66]
The single vehicle dial a ride problem	Non orienté, 1 sommet dépôt D, 2 ensembles de sommets disjoints (pickup et delivery)	1	Capacité Q	p	Chaque sommet représente le lieu de départ d'une personne ou le lieu de son arrivée	Trouver un circuit qui satisfait toutes les demandes	Psaraftis [162]
The multi vehicle dial a ride problem	Non orienté, 1 sommet dépôt D, 2 ensembles de sommets disjoints (pickup et delivery)	k	Capacité Q	p	Chaque sommet n'a qu'un seul type de marchandise fournit et demandé, et une marchandise n'a qu'un sommet de départ et de destination	Trouver k circuits qui satisfaient toutes les demandes	Jaw et al.[105]
The vehicle routing problem with pickups, deliveries and transhipments	Non orienté, 1 sommet dépôt D, 3 ensembles de sommets disjoints (pickup, delivery, et Transshipment)	k	Capacité Q	p	-	Trouver k circuits qui satisfaient toutes les demandes mais une marchandise peut être transportée par plusieurs véhicules différents grâce au sommet Transshipment	Mitrović-Minić et Laporte [148]

Annexe C

Analyse des variables aléatoires liées aux transports de patients

Les graphiques suivants ont été établis grâce aux données prélevées au SAMU sur un an (2008) et à la Centrale des Ambulanciers sur un an (2007) également.

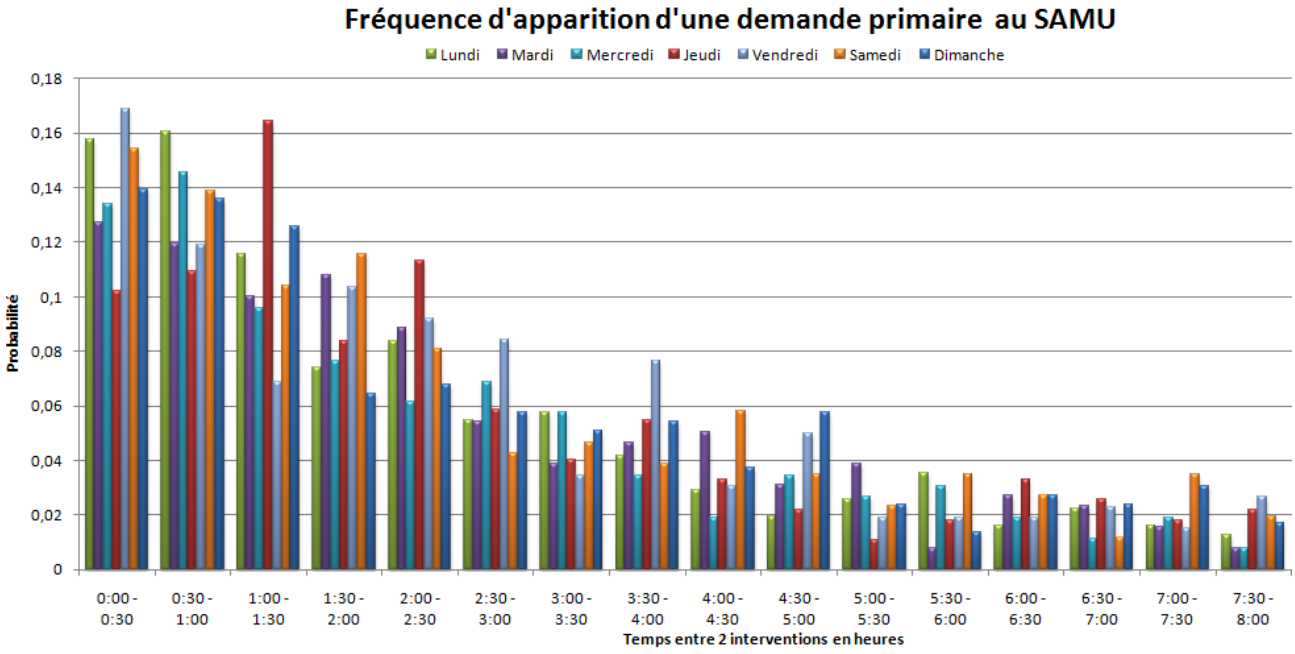


FIG. C.1 – Intervention Primaire

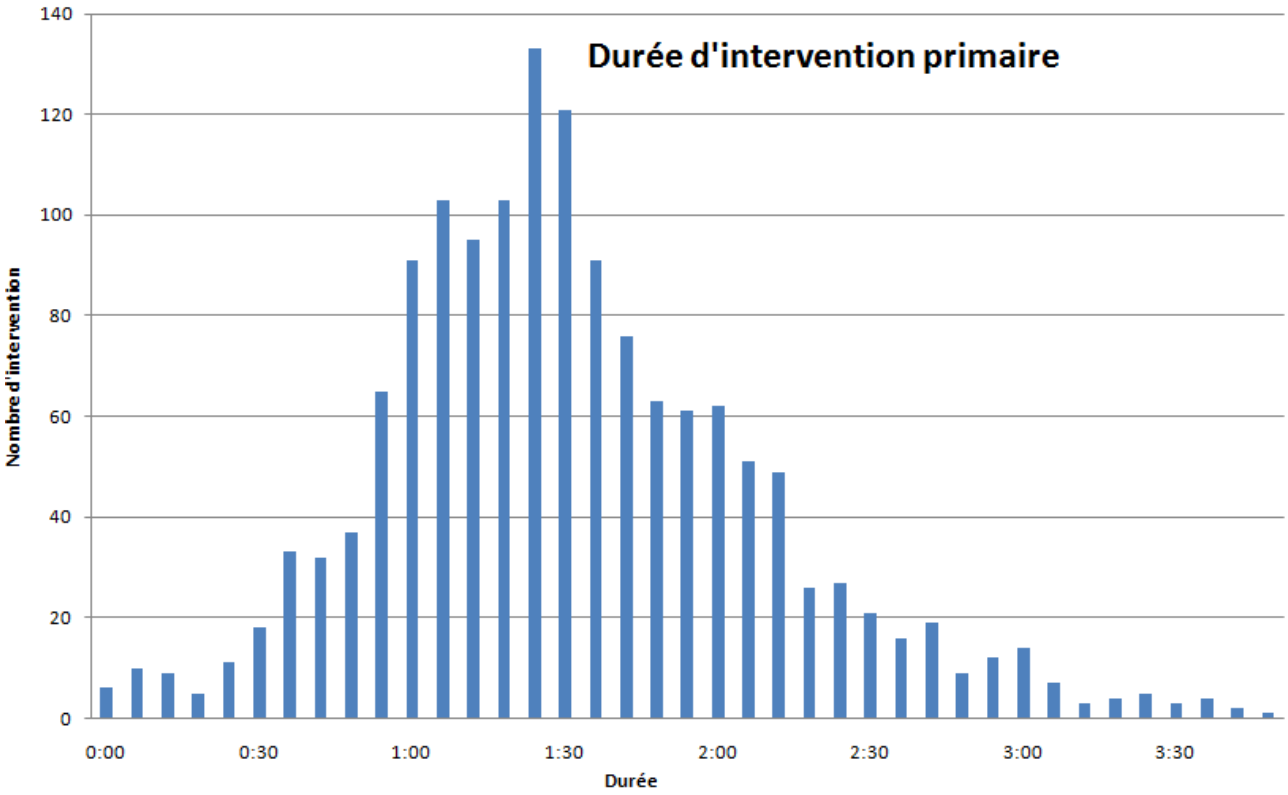


FIG. C.2 – Durée intervention Primaire

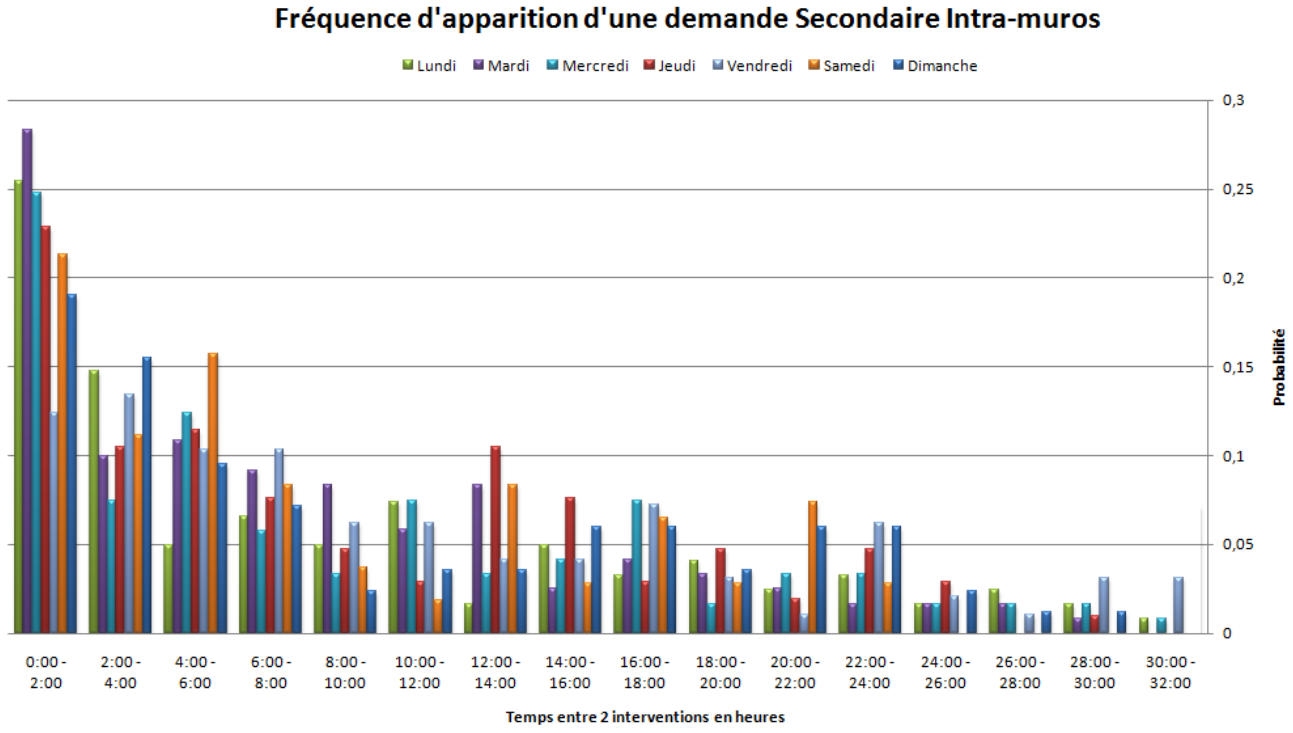


FIG. C.3 – Intervention Secondaire intra muros

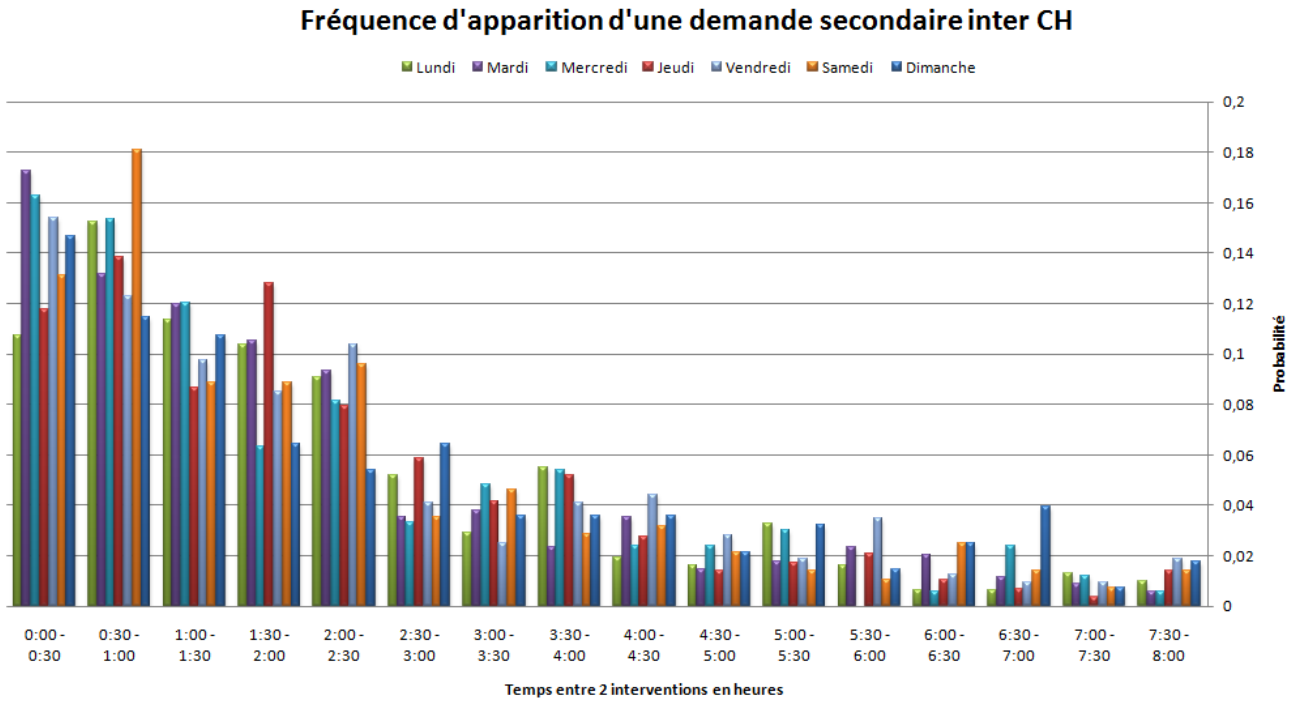


FIG. C.4 – Intervention Secondaire inter CH

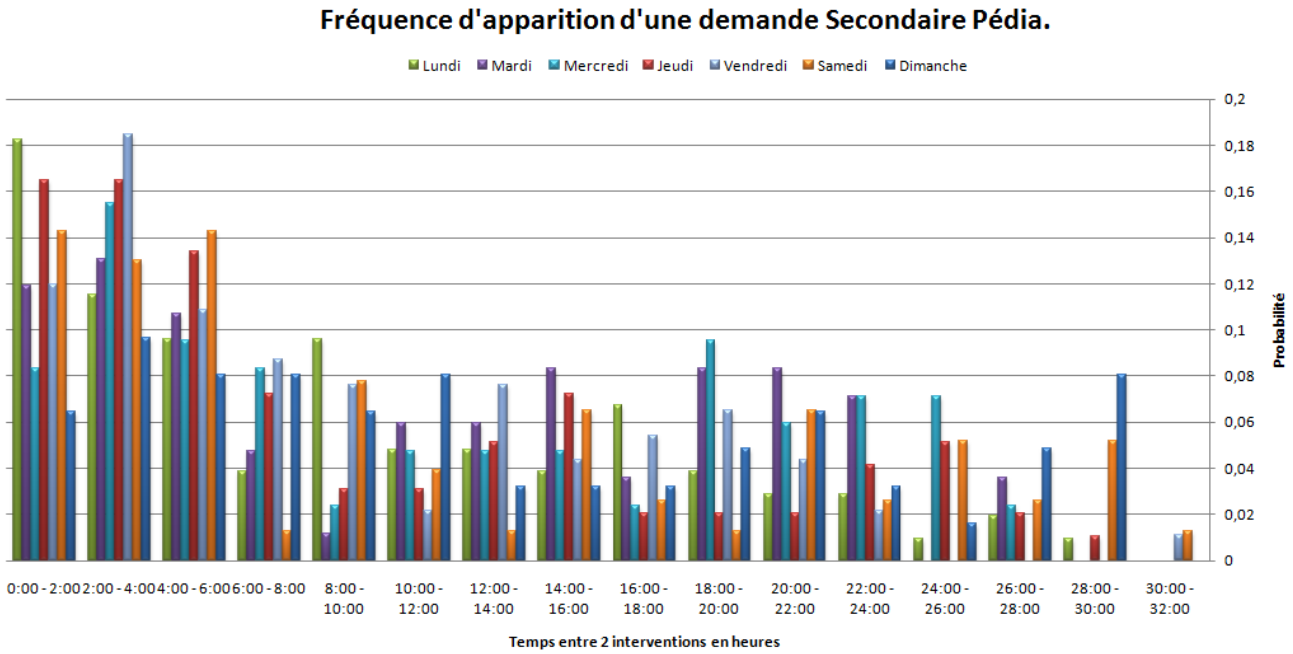


FIG. C.5 – Intervention Secondaire pédiatrique

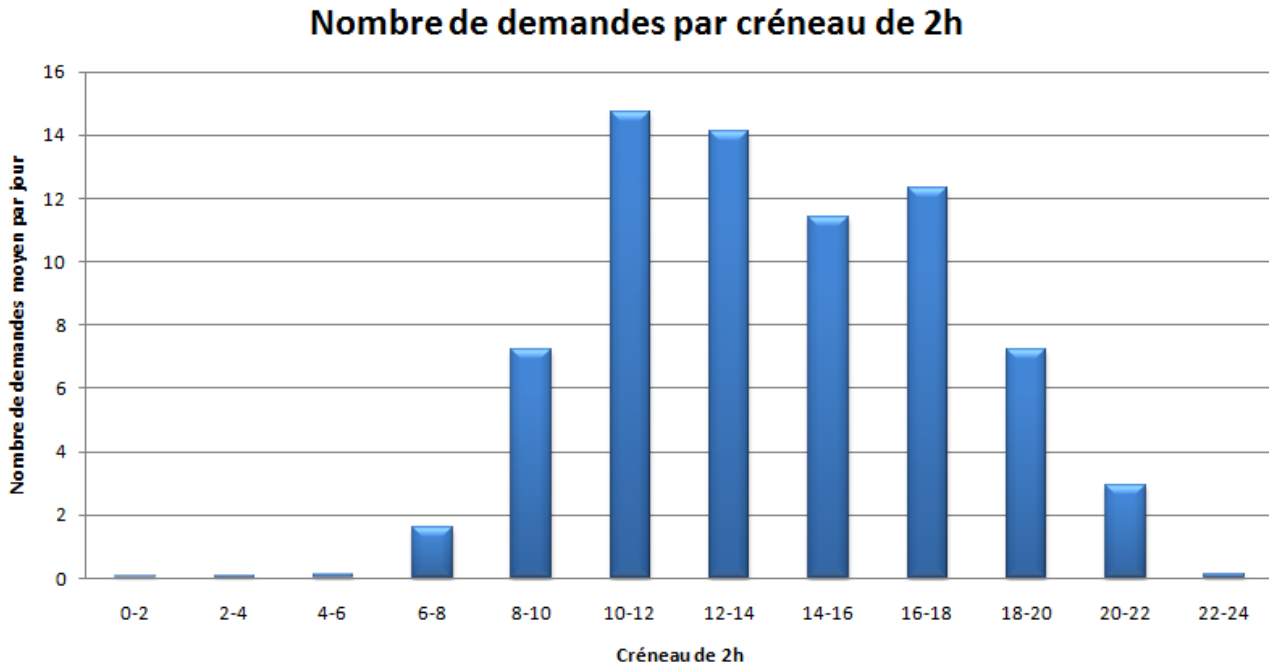


FIG. C.6 – Nombre de demandes en moyenne par jour (WE compris) par créneau horaire (CA)

Bibliographie

[1] R. K. Ahuja, T. L. Magnanti, and J. B. Orlin. *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications.* Prentice Hall, NJ, 1993.

[2] O. I. Alsalloum and G. K. Rand. Extensions to emergency vehicle location models. *Computers & Operations Research*, 33 :2725–2743, 2006.

[3] E. Angelelli and M. G. Speranza. The periodic vehicle routing problem with intermediate facilities. *European Journal of Operational Research*, 137 :233–247, 2002.

[4] S. Anily. The vehicle routing problem with delivery and back-haul options. *Naval Research Logistics*, 43 :415–434, 1992.

[5] S. Anily and R. Hassin. The swapping problem. *Networks*, 22 :419–433, 1992.

[6] C. Araz, H. Selim, and I. Ozkarahan. A fuzzy multi-objective covering-based vehicle location model for emergency services. *Computers & Operations Research*, 34 :705–726, 2007.

[7] A. Attanasio, J. F. Cordeau, G. Ghiani, and G. Laporte. Parallel tabu search heuristics for the dynamic multi-vehicle dial-a-ride problem. *Parallel Computing*, 30 :377–387, 2003.

[8] V. Augusto, X. Xie, and V. Perdomo. Operating theatre scheduling with patient recovery in both operating rooms and recovery beds. Computers & Industrial Engineering: Article in Press - Corrected Proof, 2009.

[9] P. Badeau, M. Gendreau, F. Guertin, J.Y. Potvin, and E. Taillard. A parallel tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research*, 5 :109–122, 1997.

[10] E. Balas, M. Fischetti, and W. R. Pulleyblank. The precedence-constrained asymmetric traveling salesman polytope. *Mathematical Programming A*, 68 :241–265, 1995.

[11] M. Banerjea-Brodeur, J.F. Cordeau, G. Laporte, and A. Lasry. Scheduling linen deliveries in a large hospital. *Journal of the Operational Research Society*, 49 :777–780, 1998.

[12] P. Bardu. Projet de fin d'étude : simulation de la logistique du chru de tours. Technical report, Département Informatique de Polytech'Tours, 2009.

[13] A. Beaudry, G. Laporte, T. Melo, and S. Nickel. Dynamic transportation of patients in hospitals. *O.R. Spectrum*, 32 :1–31, 2008.

[14] J. M. Belenguer, E. Benavent, P. Lacomme, and C. Prins. Lower and upper bounds for the mixed capacitated arc routing problem. *Computers & Operations Research*, 33 :3363–3383, 2006.

[15] J. Beliën. *Exact and heuristic methodologies for scheduling in hospitals: Problems, formulations and algorithms.* PhD thesis, Decision Sciences and Information Management, Faculty of Economics and Applied Economics, Leuven, 2006.

[16] E. Beltrami and L. Bodin. Networks and vehicle routing for municipal waste collection. *Networks*, 4 :568–581, 1974.

[17] G. Berbeglia, J. F. Cordeau, I. Gribkovskaia, and G. Laporte. Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey. *TOP*, 15 :901–1059, 2007.

[18] G. Berbeglia, J. F. Cordeau, and G. Laporte. Dynamic pickup and delivery problems. *European Journal of Operational Research*, 202 :8–15, 2010.

[19] D. Boldy. The relationship between decision support systems and operational research: health care examples. *European Journal of Operational Research*, 29 :128–134, 1987.

[20] D. Boldy and P. C. O'Kane. Health operational research - a selective overview. *European Journal of Operational Research*, 10 :1–9, 1982.

[21] G. Booch, J. Rumbaugh, and I. Jacobson. *Uml : Guide De L'utilisateur.* Eyrolles, 1999.

[22] R. Borndörfer, F. Klostermeier, M. Grötschel, and C. Küttner. Telebus berlin: vehicle scheduling in a dial-a-ride system. Technical report, SC 97-23, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik, Berlin, 1997.

[23] S.C. Brailsford and P.R. Harper. O.R. in health. *European Journal of Operational Research*, 185 :901–1059, 2008.

[24] S.C. Brailsford, P.R. Harper, B. Patel, and M. Pitt. An analysis of the academic literature on simulation and modelling in health care. *Journal of Simulation*, 3 :130–140, 2009.

[25] O. Bräysy and M. Gendreau. Vehicle routing problem with time windows, part 1 : route construction and local search algorithms. *Transportation Science*, 39 :104–118, 2005.

[26] O. Bräysy and M. Gendreau. Vehicle routing problem with time windows, part 2 : metaheuristics. *Transportation Science*, 39 :119–139, 2005.

[27] E. K. Burke, P. De Causmaecker, G. V. Berghe, and H. V. Landeghem. The state of the art of nurse rostering. *Journal of Scheduling*, 7 :1094–6136, 2004.

[28] E. K. Burke, J. Li, and R. Qu. The nurse rostering problem: a critical appraisal of the problem structure. *European Journal of Operational Research*, 202 :379–389, 2010.

[29] B. Cardoen and E. Demeulemeester. Capacity of clinical pathways - a strategic multi-level evaluation tool. *Journal of Medical Systems*, 32 :443–452, 2010.

[30] B. Cardoen, E. Demeulemeester, and J. Beliën. Operating room planning and scheduling: a literature review. *European Journal of Operational Research*, 201 :921–932, 2010.

[31] M. Carter. Health care: mismanagement of resources. *ORMS Today*, 19 :26–32, 2002.

[32] M. Chabrol, D. Gallot, M. Gourgand, and S. Rodier. Health care: mismanagement of resources. *Communications in Computer and Information Science*, 14 :59–68, 2008.

[33] S. Chahed, E. Marcon, E. Sahin, D. Feillet, and Dallery Y. Exploring new operational research opportunities within the home care context : the chemotherapy at home. *Health Care Management*, 12 :179–191, 2009.

[34] N. Christofides. The optimum traversal of a graph. *Omega*, 1 :719–732, 1973.

[35] N. Christofides, V. Campos, A. Corberán, and E. Mota. An algorithm for the rural postman problem on a directed graph. *Mathematical Programming Study*, 26 :155–166, 1986.

[36] F. Chu, N. Labadi, and C. Prins. A scatter search for the periodic capacitated arc routing problem. *European Journal of Operational Research*, 169 :586–605, 2006.

[37] A. Coja-Oghlan, S. O. Krumkeb, and T. Nierhoff. A heuristic for the stacker crane problem on trees which is almost surely exact. *Journal of Algorithms*, 61 :1–19, 2006.

[38] D. Conforti, F. Guerriero, and R. Guido. Non-block scheduling with priority for radiotherapy treatments. *European Journal of Operational Research*, 201 :289–296, 2010.

[39] A. Corberán, R. Marti, E. Martinez, and D. Soler. The rural postman problem on mixed graphs with turn penalties. *Computers & Operations Research*, 29 :887–903, 2002.

[40] A. Corberán, R. Marti, and A. Romero. A heuristics for the mixed rural postman problem. *Computers & Operations Research*, 27 :183–203, 2000.

[41] A. Corberán, A. Romero, and J. M. Sanchis. The general routing problem on a mixed graph. Technical report, University of Valencia, 1999.

[42] J. F. Cordeau. A branch-and-cut algorithm for the dial-a-ride problem. *Operations Research*, 54 :573–586, 2006.

[43] J.-F. Cordeau and G. Laporte. A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem. *Transportation Research B*, 37 :579–594, 2003.

[44] J. F. Cordeau and G. Laporte. The dial-a-ride problem: models and algorithms. *Annals of Operations Research*, 153 :29–46, 2007.

[45] J.F. Cordeau, M. Gendreau, and G. Laporte. A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems. *Networks*, 37 :105–119, 1998.

[46] L. Coslovich, R. Pesenti, and W. Ukovich. A two-phase insertion technique of unexpected customers for a dynamic dial-a-ride problem. *European Journal of Operational Research*, 175 :1605–1615, 2005.

[47] T. G. Crainic and G. Laporte. Planning models for freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 3 :409–438, 1997.

[48] T. G. Crainic, M. Toulouse, and M. Gendreau. Towards a taxonomy of parallel tabu search algorithms. *INFORMS Journal on Computing*, 9 :61–72, 1997.

[49] C. Cubillos, N. Rodriguez, and B. Crawford. A study on genetic algorithms for the darp problem. *IWINAC*, I :498–507, 2007.

[50] G.B. Dantzig, R. Fulkerson, and S. Johnson. Solution of a large-scale traveling-salesman problem. *Journal of the Operations Research Society of America*, 2 :393–410, 1954.

[51] G.B. Dantzig, J.H. Ramser, and S. Johnson. The truck dispatching problem. *Management Science*, 6 :80–91, 1959.

[52] S. Datta. Applications of O.R. in developing countries: a review. *Social Science & Medicine*, 37 :1441–1450, 1993.

[53] J.B.J.M. De Kort. Upper bounds for the symmetric 2-peripatetic salesman problem. *Optimization*, 23 :357–367, 1992.

[54] I. Deif and L. Bodin. Extension of the clarke and wright algorithm for solving the vehicle routing problem with backhauling. In Kidder A, editor, *Proceedings of the Babson conference on software uses in transportation and logistic management*, pages 75–96. Babson Park, 1984.

[55] P. Demeester, W. Souffriau, P. De Causmaecker, and G. V. Berghe. A hybrid tabu search algorithm for automatically assigning patients to beds. Artificial Intelligence in Medicine: Article in Press - Corrected Proof, 2009.

[56] G. Desaulniers, J. Desrosiers, A. Erdmann, M.M. Solomon, and F. Soumis. Vrp with pickup and delivery. In Toth P Vigo D (eds), editor, *The vehicle routing problem, SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications*, pages 225–242. Philadelphia, 2002.

[57] J. Desrosiers, Y. Dumas, M.M. Solomon, and F. Soumis. *in Handbooks in Operations Research and Management Science 8: Network Routing, M.O. Ball, T.L. Magnanti, C.L. Monma, G.L. Nemhauser (eds)*, chapter Time Constrained Routing and Scheduling, pages 35–139. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1995.

[58] J. Desrosiers, Y. Dumas, F. Soumis, S. Taillefer, and D. Villeneuve. An algorithm for mini-clustering in handicapped transport. Technical report, Les Cahiers du GERAD, G-91-02, HEC Montréal, 1991.

[59] K. F. Doerner and R. F. Hartl. *Vehicle Routing: Latest Advances and Challenges*, chapter Health Care Logistics, Emergency Preparedness, and Disaster Relief : New Challenges for Routing Problems with a Focus on the Austrian Situation, pages 527–550. In: B.L. Golden, S. Raghavan and E.A. Wasil, Editors, 2008.

[60] M. Dror and M. Haouari. Generalized steiner problems and other variants. *Journal of Combinatorial Optimization*, 4 :415–436, 2000.

[61] M. Dror and A. Langevin. A generalized traveling salesman problem approach to the directed clustered rural postman problem. *Transportation Science*, 31 :187–192, 1997.

[62] M. Dror, H. Stern, and P. Trudeau. Postman tour on a graph with precedence relation on arcs. *Networks*, 17 :283–294, 1987.

[63] M. Dror and P. Trudeau. Savings by split delivery routing. *Transportation Science*, 23 :141–145, 1989.

[64] M. Dror and P. Trudeau. Split delivery routing. *Naval Research Logistics*, 37 :383–402, 1990.

[65] Y. Dumas, J. Desrosiers, and F. Soumis. Large scale multi-vehicle dial-a-ride problems. Technical report, Les Cahiers du GERAD, G-89-30, HEC Montréal, 1989.

[66] Y. Dumas, J. Desrosiers, and F. Soumis. The pickup and delivery problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 54 :7–22, 1991.

[67] J. Edmonds and E. L. Johnson. Matching, euler tours and the chinese postman. *Mathematical Programming*, 5 :88–124, 1973.

[68] H. Fei, N. Meskens, and C. Chu. A planning and scheduling problem for an operating theatre using an open scheduling strategy. Computers & Industrial Engineering: Article in Press - Corrected Proof, 2009.

[69] D. Feillet, P. Dejax, and M. Gendreau. Traveling salesman problems with profits. *Transportation science*, 39 :188–205, 2005.

[70] D. Feillet, P. Dejax, M. Gendreau, and C. Gueguen. Vehicle routing with time windows and split deliveries. *Proceedings of Odysseus 2003, Palermo*, 2003.

[71] C. Fiegl and C. Pontow. Online scheduling of pick-up and delivery tasks in hospitals. *Journal of Biomedical Informatics*, 42 :624–632, 2009.

[72] M. Fischetti, S. Martello, and P. Toth. The fixed job schedule problem with spread-time constraints. *Operations Research*, 35 :849–858, 1987.

[73] G. Fleury, P. Lacomme, and A. Tanguy. *Simulation à événements discrets : Modèles déterministes et stochastiques ; Exemples d'applications implémentées en Delphi et en C++*. Eyrolles, 2006.

[74] D.C. Florez, S. Aguirre, C.A. Amaya, and N. Velasco. Optimization of the laundry service in a public hospital in bogotá d.c., colombia : A case of vehicle routing with split delivery. *Systems and Information Engineering Design Symposium, 2008. SIEDS 2008*, IEEE :25–25, 2008.

[75] R. Floyd. Algorithm 97 : Shortest path. *Communications of the ACM*, 5 :345, 1962.

[76] P. Féniès, M. Gourgand, and S. Rodier. Interoperable and multi-flow software environment : Application to health care supply chain. *Lecture Notes in Computer Science*, 4103 :311–322, 2005.

[77] G. N. Frederickson, M. S. Hecht, and C. E. Kim. Approximation algorithms for some routing problems. *SIAM Journal on Computing*, 7 :178–193, 1978.

[78] B. E. Fries. Bibliography of operations research in health-care systems. *Operations Research*, 24 :801–804, 1976.

[79] P.W. Frizzell and J.W. Giffin. The split delivery vehicle scheduling problem with time windows and grid network distances. *Computers & Operations Research*, 22 :655–667, 1995.

[80] V. Gascon and P. Michelon. Scheduling the carriers of a hospital delivery service. *Socio-Economic Planning Sciences*, 31 :57–67, 1997.

[81] M. Gendreau, F. Guertin, J.Y. Potvin, and R. Séguin. Neighborhood search heuristics for a dynamic vehicle dispatching problem with pick-ups and deliveries. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 14 :157–174, 2006.

[82] M. Gendreau, F. Guertin, J.Y. Potvin, and E. Taillard. Parallel tabu search for real-time vehicle routing and dispatching. *Transportation Science*, 33 :381–390, 1999.

[83] M. Gendreau, A. Hertz, and G. Laporte. The traveling salesman problem with backhauls. *Computers & Operations Research*, 23 :501–508, 1996.

[84] M. Gendreau, G. Laporte, and F. Semet. A branch-and-cut algorithm for the undirected selective traveling salesman problem. *Networks*, 32 :263–273, 1998.

[85] M. Gendreau, G. Laporte, and R. Séguin. Stochastic vehicle routing. *European Journal of Operational Researc*, 88 :3–12, 1996.

[86] G. Ghiani, F. Guerriero, G. Laporte, and R. Musmanno. Real-time vehicle routing : Solution concepts, algorithms and parallel computing strategies. *European Journal of Operational Research*, 1 :1–11, 2003.

[87] C. A. Glass and R. A. Knight. The nurse rostering problem: a critical appraisal of the problem structure. *European Journal of Operational Research*, 202 :379–389, 2010.

[88] F. Glover. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operations Research*, 13 :55 :533–549, 1986.

[89] D.E. Goldberg. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. *Reading, Mass. : Addison-Wesley*, 1989.

[90] B. L. Golden and R. T. Wong. Capacitated arc routing problems. *Networks*, 11 :305–315, 1981.

[91] R. Graham, E. Lawler, J. Lenstra, and A. R. Kan. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey. *Annals of Discrete Mathematics*, 5 :287–326, 1979.

[92] M. Guan. Graphic programming using odd and even points. *Chinese Mathematics*, 1 :273–277, 1962.

[93] G. Gutin and P. Abraham. *The Traveling Salesman Problem and Its Variation.* Springer, 2007.

[94] T. Hannes, T. Melo, and S. Nickel. Bringing robustness to patient flow management through optimized patient transports in hospitals. *Interfaces*, 39 :241–255, 2009.

[95] P. Hansen. The steepest ascent mildest descent heuristic for combinatorial programming. *Congress on Numerical Methods in Combinatorial Optimization, Capri*, 1986.

[96] J. M. Harrold and R. S. Parker. Clinically relevant cancer chemotherapy dose schedulingnext term via mixed-integer optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 33 :2042–2054, 2009.

[97] H. Hernández-Pérez and J. J. Salazar-González. The one-commodity pickup-and-delivery travelling salesman problem. *Combinatorial optimization - Eureka, you shrink !*, pages 89–104, 2003.

[98] S.C. Ho and D. Haugland. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and split deliveries. *Computers & Operations Research*, 31 :1947–1964, 2004.

[99] J.H. Holland. Adaptation in natural and artifical systems. *The university of Michigan Press, Ann Arbor, MI, USA*, 1975.

[100] B.L. Hollis, M.A. Forbes, and B.E. Douglas. Vehicle routing and crew scheduling for metropolitan mail distribution at australia post. *European Journal of Operational Research*, 173 :133–150, 2006.

[101] M. Horn. Fleet scheduling and dispatching for demand-responsive passenger services. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 10 :35–63, 2002.

[102] S. Ichoua, M. Gendreau, and J.Y. Potvin. Diversion issues in real-time vehicle dispatching. *Transportation Science*, 34 :426–438, 2000.

[103] I. Ioachim, J. Desrosiers, Y. Dumas, and M. M. Solomon. A request clustering algorithm for door to door handicapped transportation. *Transportation Science*, 29 :63–78, 1995.

[104] S.H. Jacobson, S.N. Hall, and J.R. Swisher. *Patient Flow : Reducing Delay in Healthcare Delivery, International Series in Operations Research and Management Science*, chapter Discrete-event simulation of health care systems, pages 211–252. R.W. Hall, Editors, Springer, New York, 2006.

[105] J.J. Jaw, A.R. Odoni, H.N. Psaraftis, and N.H.M. Wilson. A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride problem with time windows. *Transportation Research Part B*, 20 :243–257, 2003.

[106] D.S. Johnson and C.H. Papadimitriou. *The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization*, chapter Computational complexity. In: E.L. Lawler, J.K. Lenstra, A.H.G. Rinnooy Kan and D.B. Shmoys, Editors, Wiley, Chichester, 1985.

[107] K. Jongens and T. Volgenant. The symmetric clustered traveling salesman problem. *European Journal of Operational Research*, 19 :68–75, 1985.

[108] J. B. Jun, S. H. Jacobson, and J. R. Swishe. Application of discrete-event simulation in health care clinics: a survey. *The Journal of the Operational Research Society*, 50 :109–123, 1999.

[109] I. Kara and T. Bektas. Integer linear programming formulations of multiple salesman problems and its variations. *European Journal of Operational Research*, 174 :1449–1458, 2006.

[110] Y. Kergosien, C. Lenté, and J.C. Billaut. A dynamic transportation problem of patients between care units. In *4th International Conference on Operational Research Applied to Health Services (ORAHS'2008), Toronto (Canada), 28 Juillet - 1er Aout*, 2008.

[111] Y. Kergosien, C. Lenté, and J.C. Billaut. Planification de transports de patients entre unités de soin. In *Gestion et Engénierie des Systèmes Hospitaliers (GISEH'08), pp. 551-558, Lausanne (Suisse), 4-6 septembre, ISBN 978-2-8399-0316-5*, 2008.

[112] Y. Kergosien, C. Lenté, and J.C. Billaut. A tabu search algorithm for solving a transportation problem of patients between care units. In *International Workshop on Scheduling in Healthcare systems (SCHEALS'08), Proceedings of the 1st International Conference on Applied Operational Research (ICAOR 2008), Lecture Notes in Management Science,vol. 1, pp. 18-31, Yerevan (Arménie), 15-16 septembre, ISSN 2008-0050.*, 2008.

[113] Y. Kergosien, C. Lenté, and J.C. Billaut. A genetic algorithm and a simulation tool for the design of hospital material flows. In *35th International Conference on Operational Research Applied to Health Services (ORAHS'2009), Leuven (Belgique), 12-17 Juillet*, 2009.

[114] Y. Kergosien, C. Lenté, and J.C. Billaut. Home health care problem : An extended multiple traveling salesman problem. In *4th Multidisciplinary International Conference on Scheduling : Theory and Applications (MISTA'09), Dublin (Irlande), 10-12 Août*, 2009.

[115] Y. Kergosien, C. Lenté, and J.C. Billaut. Management of material flows within a hospital : a two interconnected vehicle routing problem. In *Joint International Meeting of the Canadian Operational Research Society and the Institute for Operations Research & the Management Sciences (CORS-INFORMS'09), Toronto (Canada), p. 90, 14-17 Juin*, 2009.

[116] Y. Kergosien, C. Lenté, and J.C. Billaut. Planification de flux logistiques hospitaliers, dimensionnement d'équipes de manutention et synchronisation de tournées. In *Workshop International : Logistique et Transport (LT'09), Sousse (Tunisie), 22-24 mars*, 2009.

[117] Y. Kergosien, C. Lenté, and J.C. Billaut. Problème de tournée de personnel de soin pour l'hospitalisation à domicile. In *10ème congrès de la Société de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF'09), Nancy, 10-12 février*, 2009.

[118] Y. Kergosien, C. Lenté, and J.C. Billaut. A memetic algorithm for the design of hospital material flows. In *36th International Conference on Operational Research Applied to Health Services (ORAHS'2010), Soumission en cours, Genova (Italy), 18-23 Juillet*, 2010.

[119] Y. Kergosien, C. Lenté, and J.C. Billaut. Planification de flux logistiques hospitaliers, dimensionnement d'équipes de manutention et synchronisation de tournées. In *8ème Conférence Internationale de Modélisation et Simulation (MOSIM'10), Hammamet, 10-12 Mai*, 2010.

[120] Y. Kergosien, C. Lenté, and J.C. Billaut. Problème dynamique de transport de patients. In *11ème congrès de la Société de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF'10), Toulouse, 24-26 février*, 2010.

[121] Y. Kergosien, C. Lenté, and J.C. Billaut. A tabu search heuristic for a dynamic transportation of patients between care units. Soumis à C&OR (Major Revision 03/03/10), 2010.

[122] Y. Kergosien, C. Lenté, and J.C. Billaut. A tabu search heuristic for the design of hospital material flows. In *12th International Workshop on Project Management and Scheduling (PMS'10), Tours, 26-28 Avril*, 2010.

[123] Y. Kergosien, J.F. Tournamille, P. Jaulin, B. Laurence, J. Yuan, and J.C. Billaut. Planification et traçabilité de la production de chimiothérapies anticancéreuses : mise en place d'une solution intégrée performante. In *Conférence Francophone Gestion et Ingénierie des SystèmEs Hospitaliers (GISEH'10), Soumission en cours, Clermont-Ferrand, 2-4 Sept.*, 2010.

[124] G. Kiechle, K. F. Doerner, M. Gendreau, and R. F. Hartl. Waiting strategies for regular and emergency patient transportation. *Operations Research Proceedings 2008*, 6 :271–276, 2009.

[125] K. King and J. Muckstadt. Evaluating planned capacities for public health emergency supply chain models. Technical report, School of Operations Research and Information Engineering Cornell University, 2009.

[126] P. Lacomme, C. Prins, and W. Ramdane-Chérif. Evolutionary algorithms for periodic arc routing problems. *European Journal of Operational Research*, 165 :535–553, 2005.

[127] S. Landry and R. Philippe. How logistics can service healthcare. *Supply Chain Forum*, 5 :24–30, 2004.

[128] S. D. Lapierre and A. B. Ruiz. Scheduling logistic activities to improve hospital supply systems. *Computers & Operations Research*, 34 :624–641, 2007.

[129] G. Laporte. The vehicle routing problem : An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operations Research*, 59 :345–358, 1992.

[130] G. Laporte. Modeling and solving several classes of arc routing problems as traveling salesman problems. *Computers & Operations Research*, 24 :1057–1061, 1997.

[131] G. Laporte. What you should know about the vehicle routing problem. *Naval Research Logistics*, 54 :811–819, 2007.

[132] A Larsen. *The dynamic vehicle routing problem*. PhD thesis, Institue of Mathematical Modeling, Technical University of Denmark, 2001.

[133] A.M. Law and W.D. Kelton. *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill Higher Education, Adresse, 1997.

[134] J. K. Lenstra and A. H. G. Rinnooy-Kan. On the general routing problem. *Networks*, 6 :273–280, 1976.

[135] A. N. Letchford and R. W. Eglese. The rural postman problem with deadline classes. *European Journal of Operational Research*, 105 :390–400, 1998.

[136] L. X. Li and W. C. Benton. Performance measurement criteria in health care organizations: review and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 93 :449–468, 1996.

[137] M. J. Liberatore and R. L. Nydick. The analytic hierarchy process in medical and health care decision making: a literature review. *European Journal of Operational Research*, 189 :194–207, 2008.

[138] Y. Luo and P. Schonfeld. A rejected-reinsertion heuristic for the static, dial-a-ride problem. *Transportation Research Part B*, 41 :736–755, 2007.

[139] O.B.G. Madsen, H.F. Ravn, and J.M. Rygaard. A heuristic algorithm for a dial-a-ride problem with time windows, multiple capacities, and multiple objectives. *Annals of Operations Research*, 60 :193–208, 1995.

[140] E. Marcon, S. Kharraja, N. Smolski, B. Luquet, and J. P. Viale. Determining the number of beds in the postanesthesia care unit: a computer simulation flow approach. *Anesthesia and Analgesia*, 96 :1415–1423, 2003.

[141] S. McClean, P. Millard, E. El-Darzi, and C. (Eds.) Nugent. *Intelligent Patient Management*. Springer, Berlin Heidelberg, 2009.

[142] E. Melachrinoudis, A. B. Ilhan, and H. Min. A dial-a-ride problem for client transportation in a health-care organization. *Computers & Operations Research*, 34 :742–759, 2007.

[143] J.E. Mendoza, B. Castanier, C. Guéret, A.L. Medaglia, and N. Velasco. A memetic algorithm for the multi-compartment vehicle routing problem with stochastic demands. *Computers & Operations Research*, In Press, Corrected Proof, 2009.

[144] C.E. Miller, A.W. Tucker, and R.A. Zemlin. Integer programming formulation of travelling salesman problems. *Journal of the ACM*, 7 :326–329, 1960.

[145] D. Min and Y. Yih. An elective surgery scheduling problem considering patient priority. *Computers & Operations Research*, 37 :1091–1099, 2010.

[146] E. Minieka. The chinese postman problem for mixed networks. *Management Science*, 25 :643–648, 1979.

[147] S. Mitrović-Minić and R. Krishnamurti. The multiple tsp with time windows : vehicle bounds based on precedence graphs. *Operations Research Letters*, 34 :111–120, 2006.

[148] S. Mitrović-Minić and G. Laporte. The pickup and delivery problem with time windows and transshipment. *INFOR*, 44 :217–227, 2006.

[149] P. Moscato. *Memetic algorithms : a short introduction*, pages 219–234. In : D. Corne, M. Dorigo and F. Glover, Editors, New Ideas in Optimization, McGraw-Hill, 1999.

[150] G. Mosheiov. The traveling salesman problem with pick-up and delivery. *European Journal of Operational Research*, 79 :299–310, 1994.

[151] P. A. Mullaseril, M. Dror, and J. Leung. Split-delivery routeing heuristics in livestock feed distribution. *Operational Research Society*, 48 :107–116, 1997.

[152] C. E. Noon. *The Generalized Traveling Salesman Problem.* PhD thesis, Department of Industrial Engineering and Operations Research, University of Tennessee, 1988.

[153] C. E. Noon and J. C. Bean. An efficient transformation of the generalized traveling salesman problem. *INFOR*, 31 :39–44, 1993.

[154] J. P. Oddoye, D. F. Jones, M. Tamiz, and P. Schmidt. Combining simulation and goal programming for healthcare planning in a medical assessment unit. *European Journal of Operational Research*, 193 :250–261, 2009.

[155] C. S. Orloff. A fundamental problem in vehicle routing. *Networks*, 4 :35–64, 1974.

[156] C. H. Papadimitriou. On the complexity of edge traversing. *Journal of the ACM*, 23 :544–554, 1976.

[157] S. Parragh, K. Doerner, and R. Hartl. A survey on pickup and delivery problems : Part 1 : Transportation between customers and depot and part 2 : Transportation between pickup and delivery locations. *Journal für Betriebswirtschaft*, 58 :81–117, 2008.

[158] W. L. Pearn. Solvable cases of the k-person chinese postman problem. *Operations Research Letters*, 16 :241–244, 1994.

[159] M. C. Pedroso and D. Nakano. Knowledge and information flows in supply chains: a study on pharmaceutical companies. *International Journal of Production Economics*, 122 :376–384, 2009.

[160] M. Persson and J. A. Persson. Health economic modeling to support surgery management at a swedish hospital. *Omega*, 37 :853–863, 2009.

[161] C. Prins, C. Prodhon, and R. Wolfler Calvo. A memetic algorithm with population management (ma|pm) for the capacitated location-routing problem. In Springer Berlin / Heidelberg, editor, *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*, pages 183–194. Lecture Notes in Computer Science, 2006.

[162] H. N. Psaraftis. A dynamic programming approach to the single-vehicle, many-to-many immediate request dial-a-ride problem. *Transportation Science*, 14 :130–154, 1980.

[163] J. Puente, A. Gòmez, I. Fernàndez, and P. Priore. Medical doctor rostering problem in a hospital emergency department by means of genetic algorithms. *Computers & Industrial Engineering*, 56 :1232–1242, 2009.

[164] H. K. Rajagopalan, C. Saydam, and J. Xiao. A multiperiod set covering location model for dynamic redeployment of ambulances. *Computers & Operations Research*, 35 :814–826, 2008.

[165] M. R. Rao. A note on the multiple traveling salesman problem. *Operations Research*, 28 :628–632, 1980.

[166] B. Rekiek, A. Delchambre, and H. A. Saleh. Handicapped person transportation: an application of the grouping genetic algorithm. *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 19 :511–520, 2006.

[167] G. Righini and M. Trubian. Data-dependent bounds for the general and the asymmetric stacker-crane problems. *Discrete Applied Mathematics*, 91 :235–242, 1999.

[168] B. Roland, C. Di Martinelly, F. Riane, and Y. Pochet. Scheduling an operating theatre under human resource constraints. Computers & Industrial Engineering: Article in Press - Corrected Proof, 2009.

[169] A. Romero. *On Mixed Rural Postman Problem (in spanish).* PhD thesis, Department of Statistics and OR, University of Valencia, 1997.

[170] S. Ropke, J.-F. Cordeau, and G. Laporte. Models and branch-and-cut algorithms for pickup and delivery problems with time windows. *Networks*, 49 :258–272, 2007.

[171] J. Rosenhead. Operational research in health services planning. *European Journal of Operational Research*, 2 :75–85, 1978.

[172] Hall R.W. *Patient Flow : Reducing Delay in Healthcare Delivery.* Springer, 2006.

[173] M. W. P. Savelsbergh. Local search in routing problems with time windows. *Annals of Operations Research*, 4 :285–305, 1985.

[174] M. W. P. Savelsbergh. The vehicle routing problem with time windows: minimizing route duration. *ORSA Journal on Computing*, 4 :146–154, 1992.

[175] J.S. Shang and K.C. Carolyn. Multicriteria pickup and delivery problem with transfer opportunity. *Computers and Industrial Engineering*, 4 :631–645, 1996.

[176] H.M. Sheng, J.C. Wang, H.H. Huang, and D.C. Yen. Fuzzy measure on vehicle routing problem of hospital materials. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 30 :367–377, 2006.

[177] L.H. Shih and H.C. Chang. A routing and scheduling system for infectious waste collection. *Environmental Modeling and Assessment*, 6 :261–269, 2004.

[178] K. K. Sinha and E. J. Kohnke. Health care supply chain design: toward linking the development and delivery of care globally. *Decision Sciences*, 40 :197–212, 2009.

[179] M.M. Solomon. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, 35 :254–265, 1987.

[180] M.M. Solomon and J. Desrosiers. Time window constrained routing and scheduling problems. *Transportation Science*, 22 :1–13, 1988.

[181] K. Sorensen and M. Sevaux. Mapm : memetic algorithms with population management. *Computers & Operations Research*, 33 :1214–1225, 2004.

[182] D. Stein. An asymptotic, probabilistic analysis of a routing problem. *Mathematics of Operations Research*, 3 :89–101, 1978.

[183] R. E. Steuer. Multiple criteria optimization : theory, computation and application. *John Wiley, New York, U.S.A*, 1986.

[184] J. A. Svetska and Huckfeldt V. E. . Computational experience with an m-salesman travelling salesman algorithm. *Management Science*, 19 :790–799, 1973.

[185] E. Taillard, P. Badeau, M. Gendreau, F. Guertin, and J.Y. Potvin. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows. *Transportation science*, 31 :170–186, 1997.

[186] K.C. Tan, Y.H. Chew, and L.H. Lee. A hybrid multi-objective evolutionary algorithm for solving truck and trailer vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 172 :855–885, 2006.

[187] D. Teodorovic and G. Radivojevic. A fuzzy logic approach to dynamic dial-a-ride problem. *Fuzzy Sets and Systems*, 116 :23–33, 1998.

[188] B. Tolga. The multiple traveling salesman problem : an overview of formulations and solution procedures. *Omega*, 34 :209–219, 2006.

[189] S. Topaloglu. A shift scheduling model for employees with different seniority levels and an application in healthcare. *European Journal of Operational Research*, 198 :943–957, 2009.

[190] P. Toth and D. Vigo. The vehicle routing problem. *SIAM Monographs on discrete mathematics and applications, Philadelphia*, 2002.

[191] A. Touet. Projet de fin d'étude : simulation de transports de patients au samu et à la centrale des ambulanciers. Technical report, Département Informatique de Polytech'Tours, 2009.

[192] J.F. Tournamille, C. Bousquet, R. Respaud, V. Andre, P. Jaulin, C. Steffen, Y. Kergosien, J.C. Billaut, B. Laurence, and D. Antier. Outil de traçabilité complet d'une unité de préparation de chimiothérapies anticancereuses. développement et plus-value pharmaceutique. In *7èmes Journées de la Société Française de Pharmacie Oncologique (SFPO'09), Mandelieu, 15-16 Octobre*, 2009.

[193] X. Wang and A. C. Regan. Local truckload pickup and delivery with hard time window constraints. *Transportation Research Part B*, 36 :97–112, 2002.

[194] V. C. S. Wiers. A review of the applicability of or and ai scheduling techniques in practice. *Omega*, 25 :145–153, 1997.

[195] K. I. Wong and M. G. H. Bell. Solution of the dial-a-ride problem with multi-dimensional capacity constraints. *International Transactions in Operational Research*, 13 :195–208, 2006.

[196] Z. Xiang, C. Chu, and H. Chen. A fast heuristic for solving a large-scale static dial-a-ride problem under complex constraints. *European Journal of Operational Research*, 174 :1117–1139, 2006.

[197] Z. Xiang, C. Chu, and H. Chen. The study of a dynamic dial-a-ride problem under time-dependent and stochastic environments. *European Journal of Operational Research*, 185 :534–551, 2007.

[198] F.M. Yang and H.J. Xiao. Models and algorithms for vehicle routing problem with transshipment centers. *Systems Engineering - Theory & Practice*, 27 :28–35, 2007.

[199] G. Zäpfel and M. Bögl. Multi-period vehicle routing and crew scheduling with outsourcing options. *International Journal of Production Economics*, 113 :980–996, 2008.

[200] L. Zhang. Polynomial algorithms for the k-chinese postman problem. In Jan van Leeuwen, editor, *Volume 1: Algorithms, Software, Architecture*, pages 430–435. Elsevier, 1992.

[201] Q.H. Zhao, S.Y. Wang, K.K. Lai, and G.P. Xia. Dynamic multi period transportation model for vehicle composition with transshipment points. *Advanced Modeling and Optimization*, 3, 2001.

Glossaire

- AM : Adaptative Memory
- AR : Ambulance A de Réanimation
- CHRU : Centre Hospitalier Régionale Universitaire
- DAEL : Direction des Achats, de l'Equipement et de la Logistique
- DARP : Dial A Ride Problem
- DASRI : Déchets d'Activités de Soins à Risques Infectieux
- DMA : Déchets Ménagers et Assimilé
- EJOR : European Journal of Operational Research
- EURO : Association of European Operational Research Societies
- M-M : Many-to-Many
- ORAHS : Operational Research Applied to Health Services
- PD : Pickup and Delivery
- PDTSP : Pickup and Delivery Traveling Salesman Problem
- PLNE : Programmation Linéaire en Nombres Entiers
- PTAH : Logiciel de gestion et d'optimisation des transports en milieu hospitalier
- PVC : Problème du Voyageur de Commerce
- PUI : Pharmacie à Usage Intérieur
- Q-DTSP : Q-Delivery Traveling Salesman Problem

- RO : Recherche Opérationnelle
- SAMU : Service d'Aide Médicale Urgente
- SEC : Substours Elimination Constraints
- SCP : Stacker Crane Problem
- SDIS : Service Départemental d'Incendie et de Secours
- SMUR : Service Mobile d'Urgence et de Réanimation
- SP : Swapping Problem
- TS : Tabou Search
- TSP : Traveling Salesman Problem
- TSPB : Traveling Salesman Problem with Backhauls
- TSPPD : Traveling Salesman Problem with Pickups and Deliveries
- TSPSPD : Traveling Salesman Problem with Simultaneous Pickups and Deliveries
- UBCO : Unités de Biopharmacie Clinique Oncologique
- UCPA : Unité Centrale de Production Alimentaire
- UF : Unité Fonctionnelle
- USCI : Unité de Soins et de Cardiologie Interventionnelle
- VML : Véhicule Médicalisé de Liaison
- VRP : Vehicle Routing Problem
- VRPB : Vehicle Routing Problem with Backhauls
- VRPPD : Vehicle Routing Problem with Pickups and Deliveries
- VRPSPD : Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery
- VRP-STW : Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows

- VSAV : Véhicule de Secours et d'Assistance aux Victimes
- VSL : Véhicule Sanitaire Léger
- 1-M-1 : One-to-Many-to-One
- 1-1 : One-to-One

Yannick KERGOSIEN

Algorithmes de tournées de véhicules pour l'optimisation des flux de produits et de patients dans un complexe hospitalier

Résumé :
Cette thèse est une illustration de problèmes de Recherche Opérationnelle abordés dans le contexte hospitalier du CHRU de Tours. La problématique considérée relève des transports et plus exactement de tournées de véhicules. Cette thèse s'articule autour de l'étude de deux principaux problèmes : le transport de flux de produits et le transport de flux de patients. Le premier problème de tournées de véhicules concerne toute la gestion des différents types de flux logistiques (logistique hôtelière, pharmacie, lingerie, plateaux repas, etc.) à livrer ou à collecter dans les services de soins de chaque hôpital du CHRU de Tours. Le deuxième problème concerne les transports de patients aussi bien urgents (SAMU) que planifiés (Centrale des ambulanciers). Pour résoudre ces problèmes, plusieurs méthodes s'inspirant des techniques de la RO sont proposées : des méthodes exactes (programmation linéaire en nombres entiers), des heuristiques (algorithme glouton, recherche tabou avec et sans mémoire adaptative, algorithme génétique, algorithme mémétique) et des moteurs de simulation à événements discrets ont été développés. Des expérimentations numériques valident l'interêt et la qualité des méthodes développées.

Mots clés : Recherche Opérationnelle ; Complexe hospitalier ; Optimisation ; Tournées de véhicules ; Problème de transport de patients ; Logistique hospitalière.

Abstract :
This thesis illustratres the OR problems found in a general hospital context like the hospital complex of Tours. The problem is addressed in this thesis is a vehicle routing problem. This work focuses on the study of two main problems : the transportation of patient and the transportation of commodities. The first problem of vehicle routing deals with the logistics flows in an hospital complex (clean linen, meals carts, medicines, sterile equipments, etc.) which are to be delivered or picked up in the hospital units, located at different places in the city. The second problem deals with the emergency patient transport (Emergency Medical Assistance Service) as well as with the planned transports (ambulance central station). To solve these problems, several methods based on techniques of OR are proposed: exact methods (integer linear programming), heuristics (greedy algorithm, tabu search with and without adaptive memory, genetic algorithm, memetic algorithm), and discrete event simulations.

Keywords : Operational Research ; Hospital complex ; Optimization ; Vehicle routing ; transportation problem of patients ; Hospital Logistics.