

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'affectation 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'affectation 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, envoi 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'ordonnement 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 réordonne 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 prendre 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'affectation d'une demande à un véhicule en minimisant les distances totales parcourues des véhicules et leurs temps d'attente. Le deuxième algorithme réordonne 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 parallélisation de TS :

- "Search Control Cardinality" : 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 exécutent 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 seule 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-contrainant et sous-contrainant. 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-contrainantes, et l'autre avec les contraintes sous-contrainantes. 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 médicaux 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 essaient 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 (civière, 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 proposée 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

6.3. CONCLUSION

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.

6.3. CONCLUSION
