

## OPTIMISATION DE LIVRAISONS HOSPITALIÈRES: UNE APPROCHE PAR LES MÉTHODES DE LA RECHERCHE OPÉRATIONNELLE

Virginie ANDRE\*, Nathalie GRANGEON\*\* & Sylvie NORRE,.....

---

Résumé. – Cet article traite de l'organisation des flux logistiques dans un environnement hospitalier. Ce travail est basé sur une étude proposée par un hôpital qui souhaite réorganiser le transport de repas, de linge et de médicaments pour des hôpitaux. La réalisation de chaque activité demande l'utilisation de ressources disponibles en nombre limité et la réalisation d'étapes en amont et en aval. L'objectif est de déterminer le nombre de postes de travail nécessaires à la réalisation de toutes les activités dans une semaine, d'affecter ces activités entre les chauffeurs et de les ordonnancer de manière à respecter des contraintes de précédence, de dates de disponibilité au plus tôt et de dates de fin au plus tard. Notre problème est assimilé à un problème d'optimisation de tournées avec livraisons et enlèvements, fenêtres de temps et contraintes de ressources. Nous proposons une méthode de résolution, issue de la recherche opérationnelle, qui consiste en un couplage entre un modèle de simulation et une métaheuristique. Les résultats sont donnés pour des instances correspondant à l'étude proposée par l'hôpital.

Mots clés : logistique hospitalière ; mutualisation ; optimisation ; modèle de simulation ; livraison ; collecte.

### 1. Introduction

L'hôpital, qui fait l'objet de notre étude, est composé d'un réseau d'établissements de soins et d'unités d'approvisionnement (exemple: une blanchisserie, une restauration, une pharmacie...). Cet hôpital connaît de nombreux changements comme la centralisation des unités de production de repas, la construction d'un nouvel établissement et l'extension d'un

---

\* Maître de conférences, LEMNA (Laboratoire d'Economie et de Management de Nantes-Au'antique), Université de Nantes, IEMN-IAE Bâtiment Erdre, Chemin de la Censive du Tertre, BP 52231, 44322 Nantes Cedex 3 virginie.andre@univ-nantes.fr

\*\* Professeur d'Université, LIMOS (Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes) UMR CNRS 6158, IUT d'Allier, Université Blaise Pascal 1 Avenue Aristide Briand, 03100 Montluçon, norre@moniuLuniv-bpclermontL.fr

— Maître de conférences, LIMOS, UMR CNRS 6158, IUT d'Allier, Université Blaise Pascal, Avenue Aristide Briand, 03100 Montluçon, grangeon!pmoniuLuniv-bpclermont.fr

site existant. L'ensemble de ces travaux a nécessité de profondes réflexions pour l'organisation des flux de produits, principalement, les repas, le linge et les médicaments, nécessaires au fonctionnement de différents services hospitaliers. Avant ces travaux, l'unité en charge de l'acheminement par véhicules entre les sites de production (lieux de préparation) et les sites de consommation (services hospitaliers) devait assurer 42 activités de transport (des produits nécessaires aux différents services) par jour en disposant de 5 postes de préparation et 3 véhicules. Après les travaux, cette équipe devra gérer plus de 70 activités. La difficulté de cette étude est de proposer des changements dans l'organisation des transports en commençant par la mutualisation des ressources. En effet, les postes étaient jusqu'alors dédiés à un type de produit (i.e. chaque poste traitait un seul type de produit sans mutualisation envisagée entre les postes). Or, avec l'ensemble des activités à gérer dans l'avenir, ce mode d'organisation devra être remis en cause. Ces changements impliquent une réorganisation en profondeur des processus hospitaliers.

Le but de cet article est de montrer l'utilité des méthodes de la recherche opérationnelle (MRO) pour résoudre un problème d'optimisation logistique hospitalière et estimer les impacts de la mutualisation sur cette logistique. Tout d'abord, nous allons présenter le problème pratique d'optimisation de logistique hospitalière. Ensuite, nous présentons la méthode utilisée. Finalement, nous proposons une série de résultats qui seront comparés et commentés.

## **2. Présentation du problème et positionnement par rapport à la littérature**

Le problème consiste à organiser le transport de plusieurs types de produits (linge, repas, médicaments) pour des hôpitaux internes et externes. Un type de produit est placé dans un contenant spécifique. Le nombre de contenants disponibles pour un type de produit est connu et limité. Un contenant est préparé par un site de production, distribué dans un site de consommation, consommé, puis ramené vers le site de production pour nettoyage. Par exemple, les plateaux repas sont préparés par une Unité Centrale de Production (UCP), distribués aux unités de soin puis, après consommation, ramenés à l'UCP pour nettoyage. Le linge est nettoyé par la blanchisserie, livré aux services puis, après utilisation, ramené à la blanchisserie pour nettoyage. Les médicaments sont préparés par la pharmacie, distribués aux unités de soins et les contenants, une fois vides, sont ramenés à la pharmacie pour nettoyage. Ce processus peut se dérouler sur deux journées : le retour du contenant sur le site de production peut avoir lieu le lendemain de sa distribution. Dans la suite, nous distinguerons ces deux parties en « distribution de contenant propre » et « retour de contenant sale ».

Plusieurs ressources doivent être prises en compte. Le transport d'un contenant nécessite un chauffeur et un véhicule. Un chauffeur occupe un poste de travail, caractérisé par un planning. Un planning est défini par une heure de début et de fin de planning et lorsque le chauffeur prend une pause : une heure de début et de fin de pause. Nous distinguons deux types de plannings :

- plein temps : le planning est alors composé de deux plages de travail séparée par une pause de 30 minutes, la durée totale de travail par jour est de 8h, pause incluse;

- mi-temps : le planning est alors composé d'une seule plage de travail d'une durée de 4h.

Pour prendre sa pause, le chauffeur doit retourner au dépôt. Un chauffeur peut conduire tout type de véhicule. Il y a plusieurs types de véhicule (camion frigorifique, non-frigorifique, ...). Un type de produits ne peut pas être transporté par n'importe quel type de véhicule, mais un véhicule n'est pas dédié à un type de produit (par exemple: les repas ne peuvent être transportés que par un camion frigorifique, un camion non-frigorifique peut transporter le linge ou les médicaments). Lorsque les chauffeurs et les véhicules ne sont pas occupés, ils sont au dépôt. Chaque site (de production ou de consommation) est équipé de un ou plusieurs quai(s) de chargement ou de déchargement. Chaque site de production dispose d'une ou plusieurs aire(s) de nettoyage (qui permet de laver les contenants avant de les réutiliser) et une ou plusieurs ligne(s) de production (qui permet de remplir les contenants). Le nombre de ressources est connu et limité sur chaque site. Chaque ligne de production et chaque aire de nettoyage sont soumises à un planning d'ouverture.

Les activités de transport consistent à déplacer des contenants de produits propres (linge propre, médicaments, repas), encore appelé distribution de contenant propre (DCP), ou des contenants de produits sales (linge sale ou contenant vide), encore appelé retour de contenant sale (RCS). Par abus de langage, nous utiliserons le terme de contenant pour désigner un lot de contenants pouvant être chargé dans un camion.

La « distribution de contenant propre » est composée de 5 étapes qui nécessitent un contenant et ont une durée connue :

- Étape 1. Le remplissage du contenant qui nécessite une ligne de production;
- Étape 2. Le chargement du contenant dans le véhicule qui nécessite un chauffeur, un quai de chargement sur le site de production et un véhicule;
- Étape 3. Le transport du contenant du site de production au site de consommation qui nécessite le chauffeur et le véhicule de l'étape 2 ;
- Étape 4. Le déchargement du contenant au site de consommation qui requiert un quai de déchargement sur le site de consommation, le chauffeur et le véhicule de l'étape 3 ;
- Étape 5. La consommation du contenant sur le site de consommation.

Le « retour de contenant sale » est composé de 5 étapes qui nécessitent un contenant et ont une durée connue :

- Étape 1. L'acheminement du contenant des unités de soins au quai de chargement du site de consommation ;
- Étape 2. Le chargement du contenant dans le véhicule qui nécessite un chauffeur, un quai de chargement sur le site de consommation et un véhicule ;
- Étape 3. Le transport du contenant du site de consommation au site de production qui nécessite le chauffeur et le véhicule de l'étape 2 ;

- Étape 4. Le déchargement du contenant au site de production qui requiert un quai de déchargement sur le site de production, le chauffeur et le véhicule de l'étape 3;
- Étape 5. Le nettoyage d'un contenant sur le site de production qui utilise une aire de nettoyage.

Dans la suite, nous considérons  $N$  activités à réaliser sur une journée. Une activité concerne soit la « distribution d'un contenant propre », soit le « retour d'un contenant sale ». Une activité est définie par un site origine et un site destination. Pour la « distribution d'un contenant propre », l'origine est un site de production et la destination est un site de consommation. Pour un « retour de contenant sale », l'origine est un site de consommation et la destination est un site de production. De plus, l'étape 1 de chaque activité est caractérisée par une date de début au plus tôt et l'étape 4 peut être caractérisée par une date de fin au plus tard. Il peut exister des contraintes de précédence entre deux activités : la « distribution d'un contenant propre » doit avoir lieu avant le « retour du contenant sale ».

Des trajets à vide doivent être réalisés dans les cas suivants :

- entre deux activités si la destination de la première activité est différente de l'origine de la seconde ;
- avant la première activité affectée au chauffeur : le véhicule utilisé pour l'activité et le chauffeur doivent alors faire le trajet entre le dépôt et le site origine de la première activité;
- après la dernière activité affectée à un chauffeur : un trajet à vide doit être réalisé afin de ramener le véhicule et le chauffeur du site de destination de la dernière activité au dépôt;
- entre deux activités qui utilisent deux véhicules différents : deux trajets à vide doivent être réalisés : le premier pour ramener le véhicule de la destination de la première activité au dépôt et le second du dépôt à l'origine de la seconde activité pour l'autre véhicule.

Les contraintes à prendre en compte sont les suivantes:

- les dates de début au plus tôt des activités doivent être respectées;
- les contraintes de précédence entre les activités doivent être respectées;
- les plannings des postes de travail et d'ouverture des lignes de production et des aires de nettoyage doivent être respectés;
- pour chaque type de ressource, le nombre de ressources utilisées doit être inférieur ou égal au nombre de ressources disponibles à un instant donné ;
- les dates de fin au plus tard des étapes 4 doivent être respectées.

L'objectif est la détermination du nombre de ressources (postes de travail, véhicules) nécessaires à la réalisation de toutes les activités dans une semaine, l'affectation de ces activités entre les postes de travail et l'ordonnancement de ces activités de manière à

respecter des contraintes de précédence, de dates de disponibilité au plus tôt et de dates de fin au plus tard.

Nous proposons une méthode de recherche locale itérée qui a pour objectif de construire, pour un nombre donné de postes de travail et leur planning, un ordonnancement réalisable. Un ordonnancement est dit réalisable si :

- Toutes les activités sont réalisées. Des activités ne sont pas réalisées lorsqu'elles débutent après la fermeture du site de production.
- Les heures supplémentaires ne peuvent dépasser 10 minutes pour chaque poste de travail. Un poste de travail a des heures supplémentaires s'il travaille encore après la fin de son planning.
- Les retards sont raisonnables (fonction du type d'activité), une activité est en retard si elle se termine après sa date de fin souhaitée.

Le problème de la littérature qui nous a semblé le plus proche de celui présenté ici pour l'hôpital est le problème de livraisons et enlèvements avec fenêtres de temps (Pickup and Delivery Problem with Time Windows, ou PDP-TW selon Savelsbergh et Sol, 1995). Le problème peut être décrit comme suit. Supposons un ensemble de  $n$  clients, chaque client exprimant une demande de transport pour un chargement devant être acheminé d'une origine à une destination. Chaque collecte sur les points origine et chaque livraison sur les points de destination caractérisant les demandes doivent être faites à l'intérieur d'une fenêtre de temps connue à l'avance. Nous modélisons le problème comme un graphe non orienté. Chaque sommet est caractérisé par :

- une quantité fixe, positive à livrer (ou collecter) par le véhicule (sauf pour le dépôt);
- un temps de service nécessaire au traitement de la demande du sommet : temps de chargement (ou déchargement) de la demande si le sommet est un lieu de chargement (ou de déchargement);
- une fenêtre de temps  $[e, l]$ , où  $e$ , et  $l$ , sont respectivement les bornes inférieure et supérieure de la fenêtre temporelle du sommet considéré pendant laquelle le chargement (ou déchargement) est autorisé. En d'autres termes  $e$ , représente l'heure au plus tôt à laquelle un véhicule peut livrer la marchandise et  $l$ , l'heure au plus tard.

À chaque couple de sommets  $(i, j)$  est associée une distance (coût)  $c$ , ainsi qu'un temps de transport respectant l'inégalité triangulaire.

Étant donnée une flotte de véhicules (non nécessairement identiques, donc avec des capacités différentes), l'objectif est de construire un ensemble de tournées de coût minimum, commençant et finissant au dépôt. Pour chaque véhicule la route est construite de telle manière que les contraintes suivantes soient satisfaites :

- chaque client est servi par un seul véhicule ;
- chaque client est visité exactement une fois ;

- les chargements pris en charge sur une tournée ne doivent pas dépasser la capacité du véhicule;
- la ville de chargement pour un client doit être visitée avant la ville de déchargement ;
- la date (ou heure) de départ de chaque véhicule est supérieure ou égale à  $e$ , et la date de retour au plus tard du véhicule est inférieure ou égale à  $l_i$ ;
- fenêtres de temps : pour chaque sommet, le service doit être fait dans la fenêtre de temps correspondante.

Caractéristiques	PDP-TW	Notre problème
Activités	$n$ clients/activités	$rt$ activités
Fenêtre de temps à l'origine	$[e, l_d]$	$[e_1, 00]$ (date de début de la 1- étape)
Fenêtre de temps à la destination		$(0, 4.+1]$ (date de livraison souhaitée-fin de la 4- étape)
Ressources	$m$ véhicules	$m$ postes de travail
Type de flotte	Homogène ou hétérogène	Hétérogène
Dépôt	Unique	Unique
Disponibilités des ressources	Fenêtre de temps sur le dépôt	Planning des postes de travail, des lignes de production et des aires de nettoyage
Capacité des véhicules	$q_i \sim 1$	$q_i = 1$
Taille de la charge	$d_i \sim 1$	$d_i = 1$
Durée de trajet	Connue	Connue
Transport à vide entre le dépôt et la première activité	Oui	Oui
Transport à vide entre la destination et le dépôt	Oui	Oui
Transport à vide entre deux activités	Oui	Oui
Transport à vide entre une activité et le dépôt et du dépôt à l'activité suivante (changement de véhicule)	Non	Oui
Contraintes de précédence entre les activités	Non	Oui
Prise en compte des ressources mobiles	Véhicules	Véhicules, chauffeurs et contenants
Prise en compte des ressources fixes	Aucune	Quais, Lignes de production et aires de nettoyage

Tableau 1: Comparaison des caractéristiques du PDP-TW et de notre problème.

Le Tableau 1 présente un comparatif entre les caractéristiques du PDP-TW et celles de notre problème. Les métaheuristiques ont beaucoup été utilisées pour résoudre ce type de problème. Elles permettent l'obtention de bonnes solutions sur des problèmes de tournées de

véhicules au sens large (Landrieu, 2001). Parmi les métaheuristiques nous pouvons citer, la recherche Tabou (Nanry et al., 2000), (Cordeau et Laporte, 2003), (Aldaihani et Dessouky, 2003) et (Melachrinoudis et al, 2007). Nous trouvons également des algorithmes génétiques utilisés par différents auteurs tels que (Uchimura et al, 1999), (Rekiek et al, 2006) et (Iorgensen et al, 2007).

### 3. Méthode proposée

L'objectif est de proposer un outil d'aide à la décision qui permette de répartir les activités pour un jour donné entre les postes de travail et d'ordonner ces activités tout en respectant les contraintes de précédence, de dates de début au plus tôt et de dates de fin souhaitées, avec un nombre donné de ressources et des plannings donnés pour chaque poste de travail. Une solution correspond à :

- une affectation des activités de transport aux postes de travail (qui fait quoi ?) ;
- un ordonnancement des activités de transport (dans quel ordre?) ;
- une valeur de la fonction objectif (pour quel résultat ?) qui sert de base de comparaison pour la métaheuristique.

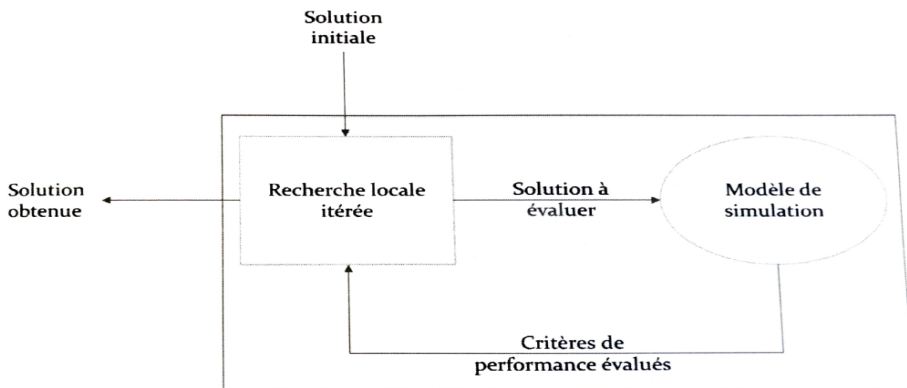


Figure 1 : Couplage Métaheuristique et modèle de simulation.

Nous proposons donc un couplage métaheuristique basée individu - modèle de simulation comme le montre la Figure 1. Le modèle de simulation permet de prendre en compte la complexité due à l'utilisation des ressources et la métaheuristique permet de résoudre le problème d'affectation et d'ordonnancement.

La recherche locale itérée perturbe une solution et la solution perturbée (nouvel ordonnancement et nouvelle affectation) est évaluée par le modèle de simulation. Ainsi, le modèle simulation évalue les critères de performance, permettant de déterminer si la nouvelle solution est meilleure que la solution initiale. La meilleure solution est conservée comme base de comparaison et une fois la recherche locale itérée terminée, la meilleure

solution obtenue est retournée avec son ordonnancement, son affectation et la valeur de la fonction objectif.

La méthode est expliquée en annexe. Dans un premier temps, nous avons développé un modèle de simulation en utilisant le logiciel Witness®. Ce modèle nous a permis d'identifier les interactions entre les entités et la complexité du problème d'ordonnancement.

Pour chaque activité, nous donnons, en entrée, le type d'activité (distribution de contenant propre ou retour d'un contenant sale), l'origine, la destination, la date de début au plus tôt, le type de véhicule, la date de fin souhaitée. À partir de l'origine et de la destination, les ressources nécessaires pour chaque activité {ligne de production, type de contenant, quais, aire de nettoyage} sont déduites. Le type d'activité et son origine nous permettent de déterminer le type de ligne de production, dans le cas d'une distribution de contenant propre. Dans le cas d'un retour de contenant sale, avec le site destination, une aire de nettoyage sera alors identifiée. Pour le transport, avec l'origine, nous pouvons en déduire le type de quai (quai de chargement du site à l'origine) et un type de quai pour la destination (quai de déchargement à la destination). Pour chaque poste de travail, nous précisons un planning de travail qui définit ses heures de travail et nous lui affectons une liste d'activités à réaliser.

Le modèle évalue la date de début de chaque étape des activités, en déduit le nombre d'activités non réalisées, le retard éventuel des activités en fonction de la date de fin souhaitée, le taux d'occupation de chaque poste de travail et le nombre d'heures supplémentaires nécessaires pour réaliser l'ensemble des activités.

Étant donné la durée d'exécution du modèle avec le logiciel Witness et le souhait de coupler le modèle de simulation avec une métaheuristique, nous avons construit un second modèle avec un langage de programmation. Le premier modèle de simulation a été utilisé pour valider le second.

## 4. Résultats

Cette partie présente les résultats obtenus pour la réorganisation des activités de transport au sein de l'hôpital. Nous avons travaillé en deux étapes :

L'étude de l'impact du mode de travail des chauffeurs, à savoir s'ils sont dédiés à un type de produit (repas ou linge et les médicaments), ou s'ils sont polyvalents, à savoir les chauffeurs peuvent utiliser différents types de véhicule dans une journée;

La réorganisation des activités de transport pour l'ensemble des étapes structurelles de l'hôpital (déménagements, construction, transferts,....).

### 4.1 *Impact du mode de travail des chauffeurs*

Nous allons présenter nos résultats en deux parties. Dans un premier temps, nous allons prendre en compte des chauffeurs dédiés. Ensuite nous considérerons des chauffeurs polyvalents.



#### 4.1.1 Chauffeurs dédiés

Nous avons décomposé le travail des chauffeurs en deux parties : les transports de repas avec les véhicules de type réfrigéré puis les transports de linge et de médicaments avec les véhicules de type standard.

##### Transports de repas

Nous avons commencé par tester notre approche sur des instances données dans (Andre, Grangeon, Norre, & Philippe, 2009) où seulement les transports de repas sont pris en compte. Le Tableau 2 présente les résultats obtenus avec :

La méthode exacte (programme linéaire) présentée dans (Andre, Grangeon, Norre, & Philippe, 2009);

Les résultats obtenus avec notre couplage (recherche locale).

M est le nombre de postes de travail à plein temps, le nombre de plage de travail est égal à 2M. H2' est la somme des retards, exprimée en minutes, et H3' le nombre d'heures supplémentaires est donné en minutes. Les chauffeurs ne sont pas soumis à des plannings de travail pour cette étude.

Méthode	N	M	Retard total H2'	Nombre d'activités avec du retard
Programme linéaire	22	4	25	2
Recherche locale			30	2
Programme linéaire	22	3	40	4
Recherche locale			45	5

Tableau 2: Résultats pour le transport de repas.

Les résultats obtenus par les deux méthodes sont très similaires. Les différences s'expliquent par le fait que, pour le programme linéaire, les chauffeurs ne réalisent ni chargement, ni déchargement sur le site de production, contrairement à la résolution avec la recherche locale. Même si les hypothèses sont légèrement différentes, l'objectif est de valider les résultats obtenus avec la métaheuristique.

##### Transports de linge et médicaments

Ensuite, nous avons étudié le transport du linge et des médicaments. Le responsable a proposé une solution avec 5 chauffeurs que nous avons évaluée avec le modèle de simulation. Nous avons utilisé notre méthode avec 5, 4,5, et 4 postes de travail. Nous rappelons que les chauffeurs peuvent travailler selon des horaires de travail correspondant soit à un plein temps (alors composé de 2 plages de travail séparées par une pause), soit un mi-temps (composé d'une plage de travail sans pause). Pour chaque instance, nous n'avons pas privilégié un critère par rapport à l'autre.

Scénarii	N	M	Nombre d'activités non réalisées	Retard total H2'	Nombre d'activités avec du retard	Nombre d'heures supplémentaires H3'	Nombre de plages de travail avec heures supplémentaires
Responsable	39	5	1	135	5	0	0
1		5	0	5	1	25	3
2		4,5	0	35	1	25	2
3		4	0	0	0	80	4

Tableau 3 : Résultats pour le transport du linge et des médicaments.

L'évaluation de la solution proposée par le responsable montre qu'une activité n'est pas réalisée, 5 activités présentent du retard pour un total de 135 minutes, mais sans heures supplémentaires. Malgré le retard (pour une activité) et le nombre d'heures supplémentaires, la solution avec 4,5 plannings (soit 9 plages de travail) a été choisie par l'hôpital car le retard peut être négocié avec le site de consommation et les heures supplémentaires ne sont pas trop importantes.

Pour conclure, un total de 8,5 postes (17 plages de travail), ce qui correspond aux 4 postes de travail pour les repas et 4,5 pour les autres produits (linge et médicament), sont nécessaires pour réaliser l'ensemble des 61 activités (22 activités de transport de repas et 39 activités de linge, médicaments) selon l'hôpital.

#### 4.1.2 Chauffeurs polyvalents

Dans cette partie, nous considérons l'ensemble des activités de transport (22 transports pour les repas et 39 transports pour le linge et les médicaments). Le Tableau 4 présente les résultats obtenus avec la recherche locale et la recherche locale itérée avec le système de voisinage insertion. Nous avons réalisé 1 000 000 itérations. Pour les résultats obtenus dans le Tableau 4a, nous avons recherché des solutions qui minimisent au maximum les retards alors que dans le Tableau 4b, nous nous sommes focalisés sur les heures supplémentaires.

Sc.	N	M	Recherche locale			Recherche locale itérée		
			H1	H2'	H3'	H1	H2'	H3'
1	61	9	0	30	0	0	25	
2		8,5	0	40	10	0	25	
3		8	0	25	15	0	25	
4		7	1	5	30	0	10	35

Sc.	N	M	Recherche locale			Recherche locale itérée		
			H1	H2'	H3'	H1	H2'	H3'
1	61	9	0	10	0	0	0	
2		8,5	0	10	0	0	0	
3		8	0	30	0	0	15	
4		7	0	40	25	0	10	40

Tableau 4: Résultats pour le transport de différents types de produits (4.a gauche et 4.b droite).

Pour chaque scénario, nous avons donné les solutions sur lesquelles nous avons travaillé avec les responsables de l'hôpital. Chacune des solutions présentées correspond à la solution validée par les responsables. Les deux méthodes permettent d'obtenir des solutions réalisables dans la plupart des cas. Ainsi, nous obtenons une solution avec 8 postes et 7 postes que nous ne pouvions pas obtenir avec des chauffeurs dédiés. Les responsables de l'hôpital ont étudié toutes ces solutions et ont remarqué que les solutions avec 7 chauffeurs n'étaient pas applicables car les chauffeurs changeaient trop souvent de véhicules.

#### 4.2 Résultats pour l'ensemble des modifications de l'hôpital

Nous avons repris l'ensemble des phases de réorganisation. Nous avons identifié une trentaine d'instances où le nombre d'activités varie de 12 à 70. Pour chaque instance, le nombre de chauffeurs est donné et les plannings de travail de chacun d'entre eux sont imposés par les responsables de l'hôpital. Deux types d'organisation ont été étudiés :

- la première concerne les chauffeurs dédiés c'est-à-dire qu'ils se consacrent soit uniquement aux transports des repas soit uniquement aux transports du linge et des médicaments;
- la seconde concerne les chauffeurs polyvalents, c'est à dire des chauffeurs qui peuvent transporter du linge, des repas et des médicaments ce qui peut entraîner des changements de véhicules.

Pour le premier type d'organisation, nous n'avons trouvé de solution que pour 7 scénarii sur 16, que ce soit avec l'une ou l'autre des méthodes utilisées. Dans le second cas, peu de solutions réalisables: seulement 5 instances sur les 14. Nous constatons toutefois que le nombre de solutions réalisables augmente et que les retards et les heures supplémentaires sont améliorés. L'analyse des résultats nous a permis de conclure que les plannings proposés ne sont pas adaptés. Afin de montrer la pertinence de la détermination des plannings, nous avons repris des instances pour lesquelles aucune solution réalisable n'avait été obtenue avec les plannings proposés par l'hôpital et avons mis en œuvre notre méthode avec d'autres plannings.

#### 4.3 Étude préliminaire du choix des plannings

Nous donnons les résultats concernant une instance où nous n'avons pas obtenu de solution réalisable. Les plannings de travail initialement proposés par les responsables étaient les suivants :

- de 6h à 11h30 puis de 12h à 14h ;
- de 6h30 à 12h puis de 12h30 à 14h30;
- de 7h à 12h puis de 12h30 à 15h ;
- de 9h à 12h puis de 12h30 à 16h ;
- de 10h à 12h30 puis de 13h à 18h;
- de 10h à 13h puis de 13h30 à 18h.

Pour cette instance, ils avaient affecté 1 poste aux plannings (1) et (2), 2 chauffeurs aux plannings (3) et (4) et 3 chauffeurs au planning (6). Le Tableau 5 donne les six scénarii que nous avons envisagés afin de montrer l'intérêt de modifier les plannings. Pour rappel, le scénario 0 désigne les plannings choisis par les responsables de l'hôpital.

Scénario	Nbre postes par plannings					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<b>0</b>	1	1	2	2	0	3
<b>1</b>	2	0	3	2	0	2
<b>2</b>	2	0	3	3	0	1
<b>3</b>	2	0	3	2	1	1
<b>4</b>	3	0	1	2	1	2
<b>5</b>	3	0	2	2	0	2
<b>6</b>	3	0	2	3	0	1

Tableau 5: Résultats obtenus pour 9 postes avec différents plannings.

Le nombre de solutions réalisables (%SR), le retard cumulé en minutes (moyenne, écart-type, minimum et maximum) et le nombre d'heures supplémentaires cumulé exprimé en minutes (moyenne, écart-type, minimum et maximum). Nous avons, pour chaque test, effectué 5 réplifications.

Scénario	%SR	Retard				Heures Supp			
		Moy	$\sigma$	Min	Max	Moy	$\sigma$	Min	Max
<b>0</b>	0%	30	23	15	75	6	12	0	30
<b>1</b>	40%	30	26	10	80	6	7	0	15
<b>2</b>	40%	27	20	10	65	5	10	0	25
<b>3</b>	20%	25	21	10	65	30	45	0	115
<b>4</b>	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
<b>5</b>	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
<b>6</b>	100%	10	0	10	10	11	16	0	40

Tableau 6 : Résultats obtenus pour 9 chauffeurs avec différents plannings.

Au travers des différentes instances testées et en particulier sur cette instance, nous avons mis en évidence l'intérêt de travailler sur la détermination des plannings des chauffeurs.

## 5. Conclusions et perspectives

Dans cet article, nous nous sommes intéressés à un problème réel assimilé à un PDP-TW avec contraintes de ressources. Compte-tenu du nombre de ressources et de la complexité de leur prise en compte, nous avons construit un modèle de simulation pour l'évaluation de critères de performance dans le but d'obtenir de nombreuses solutions, nous avons couplé ce modèle de simulation avec une recherche locale itérée. Les tests sur des instances proposées par l'hôpital ont montré que pour minimiser le nombre de postes de travail, il est plus intéressant de considérer des postes de travail polyvalents. L'hôpital a mis en œuvre une organisation de transport obtenue avec le modèle durant le mois de mars 2010. Nous avons pu observer que les durées de transports variaient très sensiblement en fonction de l'heure de la journée, rendant notre méthode sensible à ces éléments (retards pour certaines distributions). Nous souhaitons encore faire évoluer ce modèle en prenant en compte des durées de trajet dépendantes de la période de la journée.

## 6. Annexe : la méthode d'optimisation en détail

### 6.1 Critères de performance

Nous considérons trois critères d'optimisation (  $u$  représente une solution):

- $H1(u)$  la minimisation du nombre d'activités non réalisées,
- $H2(u)$  la minimisation de la somme des carrés des retards (exprimé en minutes)
- $H3(u)$  la minimisation de la somme des carrés du nombre d'heures supplémentaires (exprimé en minutes)

Les trois critères peuvent être priorisés comme suit:

$$H(u) = H1(u) + a_2 H2(u) + a_3 H3(u)$$

Avec  $a_2$  et  $a_3$  choisis en fonction de l'importance accordée par le décideur aux critères  $H2(u)$  et  $H3(u)$ . En d'autres mots, la priorité entre les critères  $H2$  et  $H3$  (portant respectivement sur les retards et les heures supplémentaires) sera établie au travers des coefficients de pondération mais le critère prioritaire restera dans tous les cas la maximisation du nombre de tâches réalisées. L'objectif principal sera de réaliser le plus grand nombre de tâches possibles (la totalité dans l'idéal) puis de minimiser les retards et les heures supplémentaires (avec des priorisations différentes en fonction des valeurs données aux paramètres  $a_2$  et  $a_3$ )

### 6.2 Recherche locale

L'encadré 1 donne le principe de la méthode. La solution initiale est générée aléatoirement tout en respectant les contraintes de précédence.

$cr$  : solution courante

**Tant que** le critère d'arrêt n'est pas atteint **Faire**

Choisir uniformément et aléatoirement  $o'$  dans le système de voisinage de  $cr$

Si  $H(o') \sim H(cr)$  **Alors**

$cr \leftarrow o'$

Fin si

Fin tant que

Encadré 1 : Principe de la recherche locale.

Cette métaheuristique raisonne sur le système de voisinage décrit ultérieurement. À chaque itération est déterminée une solution  $o'$  voisine de la solution courante  $o$ . Ce voisin  $o'$  est accepté et devient solution courante si  $H(o') \sim H(o)$ .

### 6.3 Recherche locale itérée

L'encadré 2 donne le principe de la méthode. La solution initiale est générée aléatoirement, de manière à respecter les contraintes de précédence. Ensuite, et lorsque le

critère d'arrêt n'est pas atteint, l'algorithme calcule une solution qui améliore la solution précédente. En d'autres mots, l'algorithme est lancé jusqu'à atteindre un nombre d'itérations (qu'on notera  $c$ ) où la solution trouvée ne puisse pas être améliorée. L'algorithme se base sur la recherche locale dans des « voisinages », qui sont des espaces de solutions qui sont proches de la solution actuelle. Pour chaque itération, une solution appartenant au voisinage de la solution actuelle est choisie aléatoirement. Si la solution est meilleure que la solution actuelle (i.e., son coût est inférieur à celui de la solution actuelle), nous remplaçons la solution actuelle par celle qui vient d'être sélectionnée. Sinon, la solution actuelle n'est pas changée. Ensuite, cette opération se répète jusqu'à atteindre le critère d'arrêt.

De plus, et pour éviter de rester très proche d'une solution alors que l'optimum peut se trouver encore loin, on prévoit des « sauts » à certains moments, i.e, après un certain nombre d'itérations sans amélioration, on applique plusieurs voisinages (de taille et caractéristiques différentes) afin de diversifier la recherche locale et augmenter les probabilités de trouver une solution optimale.

$A$  : nombre maximal d'itérations sans amélioration avant un saut

$c$  : nombre d'itérations sans amélioration

$a^*$  : solution record (meilleure solution obtenue)

$a$  : solution courante

$a^*+-a$

**Tant que** le critère d'arrêt n'est pas atteint **Faire**

**Si**  $c < A$  **Alors**

Choisir uniformément et aléatoirement  $a'$  dans le voisinage de  $a$

**Si**  $H(a') < H(a)$  **Alors**

$c+-0$

$a -- a'$

**Si**  $H(a) < H(a^*)$  **Alors**

$a^*+-a$

**Fin si**

**Fin si**

**Sinon**

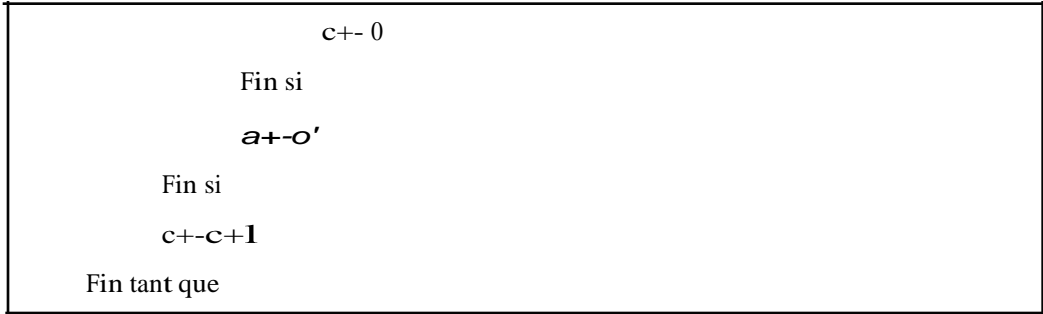
Appliquer plusieurs fois le système de voisinage sur  $a$

**Si**  $H(a') < H(a)$  **Alors**

**Si**  $H(a') < H(a^*)$  **Alors**

$a^*+-a'$

**Fin si**



Encadré 2 : Principe de la méthode locale itérée.

### 6.4 Codage des solutions

M est le nombre de plannings de travail disponibles. Un planning de travail est composé de deux plages de travail, par conséquent pour les M plannings de travail, nous avons 2M plages de travail. Une solution est représentée par un ensemble de vecteurs :  $cr = \{cr_1, cr_2, \dots, cr_{2M}\}$  où  $cr_i$  est la séquence des activités affectées aux plages de travail  $j$ ,  $j = 1, 2M$ ,  $cr_i = \{cr_{1,i}, cr_{2,i}, \dots, cr_{Nbi,i}\}$  où  $Nbi$  est le nombre d'activités affectées à une plage de travail  $j$ ,  $j = 1, 2M$  tel que  $\sum_{j=1}^{2M} Nbi = N$ .

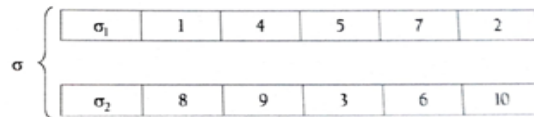
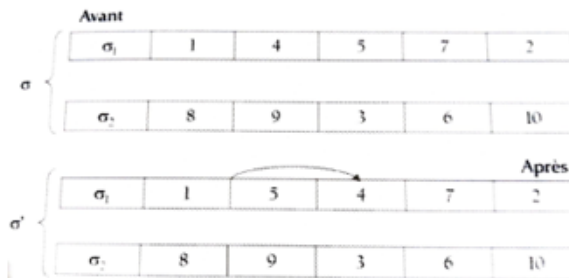


Figure 2 : Exemple d'affectation d'activités de transport aux chauffeurs.

### 6.5 Système de voisinage

Les mouvements que nous autorisons sont de deux types :

- Les mouvements intra-tournee: il s'agit de déplacer une activité dans le vecteur affecté à la même plage de travail (



- 
- Figure 3) tout en veillant à respecter les contraintes de précédence entre les activités;

- Les mouvements inter-tournées: il s'agit de déplacer une activité d'un vecteur vers une autre plage de travail (Figure 4).

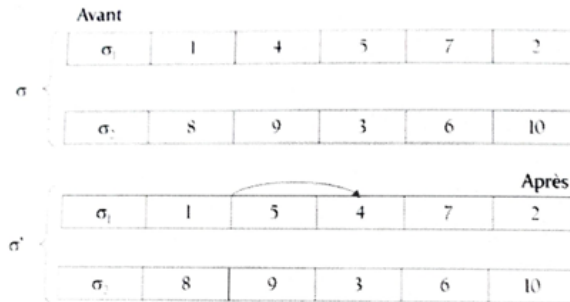


Figure 3 : Mouvement intra-tournées.

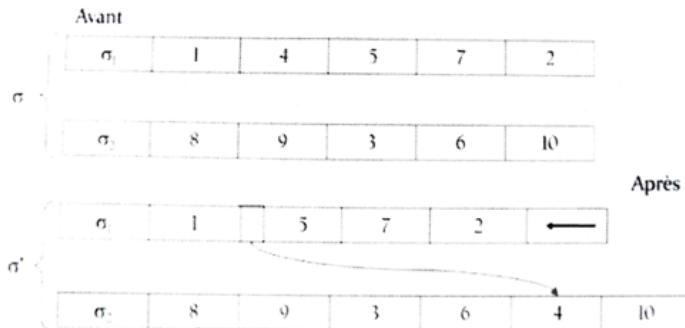


Figure 4 : Mouvement inter-tournées.

## 7. Bibliographie

- Aldaihani, M., Dessouky, M.M. (2003), Hybrid scheduling methods for paratransit operations, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 45, pp 75-96.
- André, V., Grangeon, N., Norre, S. (2009), Dimensionnement et ordonnancement de livraisons de repas. *Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, ROADEF'09*, Nancy, Février 2009.
- Bredstrom, D., Ronnqvist, M. (2008), Combined vehicle and scheduling with temporal precedence and synchronization constraints, *European Journal of Operational research*, vol. 191, pp. 19-31.
- Cordeau, J.-F., Laporte, G., (2003), A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem, *Transportation Research Part B*, vol. 37, pp 579-594.
- Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J.-Y. (1997), Vehicle Routing: modern heuristics. In Aarts, E., Lenstra, J. (eds.), *Local Search in Combinatorial Optimization*, John Wiley & Sons, New York, pp. 311-336.
- Jorgensen, R.M., Larsen, J., Bergvinsdottir, K. B. (2007), Solving the dial-a-ride problem using genetic algorithms, *Journal of the operational research society*, vol. 58, pp. 1321-1331.
- Khol, N. (1995), Exact method for time constrained routing and scheduling problems, Thèse de doctorat, Université Technique du Danemark.



- Landrieu, S. (2001), Logistique inverse et collecte des produits techniques en fin de vie, tournées de véhicules avec contraintes, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Melachrinoudis, E., Ilhan, A. B., Min H. (2007), A dial-a-ride problem for client transportation in a health-care organization, *Computers & Operations Research*, vol. 34, pp. 742-759.
- Nanry, W.P., Wesley Barnes, J. (2000), Solving the pickup and delivery problem with time windows using the reactive tabu search, *Transportation Research Part B*, 34, pp. 107-121.
- Rekiek, B., Delchambre, A., Saleh, H.A. (2006), Handicapped person transportation: an application of grouping genetic algorithm, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 19, pp. 511-520.
- Savelsbergh, M.W.P., Sol, M. (1995), The General Pickup and Delivery Problem, *Transportation Sciences*, vol. 29, pp. 17-29.
- Taillard, E., Badeau, P., Gendreau, M., Guertin, F., Potvin, J.-Y. (1997), A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows, *Transportation Sciences*, vol. 31, pp 170-186.
- Toth, P., Vigo, D. (2001). *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Uchimura, K., Saitoh, T., Takahashi, H. (1999), The Dial-a-ride Problem in a public transit system, *Electronics and Communications in Japon*, vol. 82, pp. 30-38.
- Zachariadis, E., Tarantilis, C., Kiranoudis C. (2009), A hybrid metaheuristic algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up service, *Expert Systems with Applications*, vol. 36, pp 1070-1081.