



Problème de livraison - collecte dans un environnement hospitalier : méthodes d'optimisation, modèle de simulation et couplages

Virginie André

► To cite this version:

Virginie André. Problème de livraison - collecte dans un environnement hospitalier : méthodes d'optimisation, modèle de simulation et couplages. Autre. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2011. Français. NNT : 2011CLF22203 . tel-00824815

HAL Id: tel-00824815

<https://theses.hal.science/tel-00824815>

Submitted on 22 May 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Blaise Pascal (Clermont II)
ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES POUR L'INGENIEUR

N° d'ordre : 2203

Thèse

Présentée et soutenue publiquement par

André Virginie

le 12 décembre 2011

pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

Informatique

**PROBLEME DE LIVRAISON-COLLECTE DANS UN
ENVIRONNEMENT HOSPITALIER :
METHODES D'OPTIMISATION, MODELE DE
SIMULATION ET COUPLAGES**

Directeur de la thèse :

Mme Norre Sylvie

Professeur des Universités, Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand

Co-directeur de la thèse :

Mme Grangeon Nathalie

Maître de Conférences, Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand

Examineur :

Mr Philippe Frédéric

Responsable Pôle Logistique Intégré, CHU Clermont-Ferrand

Rapporteurs :

Mr Semet Frédéric

Professeur des Universités, Ecole Centrale de Lille

Mme Espinouse Marie-Laure

Professeur des Universités, Université Joseph Fourier

Membres du jury :

Mr Soukhal Ameur

Maître de Conférences, Université François Rabelais, Tours

Remerciements

J'aimerais débiter mes remerciements par le professeur Sylvie Norre, directrice de thèse, qui m'a guidée depuis notre rencontre alors que je n'étais qu'en licence. Tout au long de ce parcours, Sylvie a toujours su me soutenir et trouver les mots (« c'est bien, mais... ») qui m'ont permis de toujours progresser et avancer dans la réalisation de mes travaux. Je n'oublie pas d'associer Nathalie Grangeon, ma co-encadrante (et mon fournisseur officiel en pâtes de fruits), qui, grâce à ses conseils avisés et ses remarques précieuses, m'a beaucoup apporté.

Je souhaite ensuite remercier Frédéric Philippe ainsi que son équipe, avec qui j'ai découvert tous les aspects de la problématique de gestion des flux matériels au sein d'un centre hospitalier aussi important que celui de Clermont-Ferrand. Frédéric m'a permis de mettre en œuvre les différentes solutions et ainsi me donner la possibilité de suivre la mise en application des méthodes que nous avons développées.

Je tiens à remercier Marie-Laure Espinouse et Frédéric Semet qui m'ont fait l'honneur d'accepter de rapporter mon travail dans des délais aussi courts. L'ensemble de leurs remarques et de leurs suggestions a permis d'améliorer la thèse. Je remercie tout particulièrement Marie-Laure Espinouse d'avoir accepté d'être la Présidente de mon Jury.

Je réserve également mes remerciements à Ameur Soukhal qui a toujours su m'indiquer des pistes intéressantes lors de nos rencontres en conférences et qui a accepté le rôle d'examineur dans mon jury dans un délai aussi court.

Le travail présenté dans ces quelques pages n'existerait pas si Alexis Jamet (directeur de la Direction des Services Économiques et Logistiques) et ses prédécesseurs n'avaient pas permis de m'inclure dans les différentes réflexions autour des problèmes organisationnels soulevés par la construction de l'Hôpital Estaing et accepter de prendre en compte les solutions que nous pouvions apporter.

L'ensemble du travail exposé ici ne serait pas aussi abouti si le personnel de l'hôpital n'avait pas accepté de me laisser évoluer dans leur quotidien. Parmi eux, je tiens à remercier pour leur professionnalisme tout particulièrement : Daniel Berger (Responsable de la blanchisserie), Frédérique Motton (Responsable de la restauration), Jean Chopineau (Responsable de la pharmacie), Vincent Pinon (Responsable du système d'information de la pharmacie), André Spinar (responsable des transports), ainsi que Yves Monier et Didier Deneffe (responsables des zones de transit). Je remercie également toutes les personnes avec qui j'ai travaillé et qui m'ont accordé leur confiance.

Ce travail m'a également permis de travailler avec des personnes d'horizon très divers et qui ont accepté de m'accorder beaucoup de leur temps pour m'aider à organiser mon travail. Une personne est particulièrement concernée : David Sarramia du Laboratoire de Physique Corpusculaire (LPC). Ces remerciements ne seraient pas complets si je ne mentionnais pas les équipes du département Gestion Logistique et Transports en particulier et de l'IUT de Montluçon en général.

Je tiens également à remercier les étudiants et doctorants avec qui j'ai travaillé tout au long du projet de construction de l'Hôpital Estaing. Pour tous les bons moments passés et les longues heures à finaliser les études, je leur dédie ces quelques lignes.

Je vais aussi remercier autant de fois que Fabrice a eu la patience de lire et relire de A à Z la totalité de ce mémoire qui ne serait qu'un recueil de coquilles. Je le remercie aussi pour sa patience et son soutien face à mes nombreuses crises d'angoisse...

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	7
<i>Chapitre 1 Contexte et problématique</i>	5
1. Introduction	5
2. Logistique hospitalière	6
2.1. Définitions de la logistique hospitalière	6
2.2. Enjeux de la logistique hospitalière	7
2.3. Les différents flux présents dans les établissements de santé	9
2.4. Les activités liées à la logistique	9
2.5. Les différents modes de réapprovisionnement des unités de soins	12
2.6. Les niveaux de décision	13
3. Le contexte au Centre Hospitalier de Clermont-Ferrand	14
3.1. Situation avant la réorganisation	15
3.2. Les différentes phases du changement	22
4. Problématique	29
4.1. Transport d'un seul type de produit	30
4.2. Transport de plusieurs types de produit	31
4.3. Dimensionnement et constitution des plannings journaliers pour les chauffeurs	31
5. Conclusion	32
<i>Chapitre 2 Transport d'un seul type de produit</i>	35
1. Introduction	35
2. Modèle de connaissance	35
3. Etat de l'art	38
4. Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)	45
4.1. RCPSP avec profil de demande en ressource variable	45
4.2. Analogie avec le problème de transport	49
5. Ordonnancement d'un seul type d'activité de transport	50
5.1. Distribution de contenant propre	51
5.2. Retour de contenant sale	53
5.3. Mise en œuvre et résultats	55
6. Ordonnancement de deux types d'activité de transport	60
6.1. Hypothèses et modélisation	60
6.2. Modèle mathématique	66
6.3. Mise en œuvre et résultats	68
7. Conclusion	69
<i>Chapitre 3 Transports de plusieurs types de produits</i>	71
1. Introduction	71
2. Modèle de connaissance	71
3. Etat de l'art	76

IV Table des matières

3.1. Le Pickup and Delivery Problem (PDP)	77
3.2. Le PDP-TW et le DARP Statique	80
3.3. Le PDP-TW-FL	91
3.4. Les autres types de problèmes de transport avec charges complètes	94
3.5. Conclusion	97
4. Approche proposée	99
4.1. Complexité de notre problème	100
4.2. Métaheuristiques	104
4.3. Modèle de simulation	108
5. Mise en œuvre et résultats	116
5.1. Impact du mode de travail des chauffeurs	116
5.2. Résultats pour l'ensemble des modifications du CHU	118
5.3. Étude préliminaire du choix des plannings	123
6. Conclusion	123
<i>Chapitre 4 Dimensionnement et constitution de plannings journaliers pour les chauffeurs</i>	125
1. Introduction	125
2. Modèle de connaissance	126
2.1. Contexte hospitalier	126
2.2. Les plannings des chauffeurs	127
3. État de l'art	128
3.1. Problème de construction des plannings	129
3.2. Les plannings du personnel soignant dans le système hospitalier	134
3.3. Construction des plannings dans un problème de transport	135
4. Processus de résolution	137
4.1. Algorithme de principe	137
4.2. Evaluation du nombre maximum de chauffeur	140
4.3. Construction des plannings journaliers	141
4.4. Affectation et ordonnancement des activités de transport	142
5. Mise en œuvre et résultats	142
6. Conclusion	147
<i>Chapitre 5 Outil d'aide à la décision</i>	149
1. Introduction	149
2. Recueil des données	149
3. Présentation de l'application	150
3.1. Cahier des charges	150
3.2. Fonctionnalités	151
3.3. Architecture	151
3.4. Modèle d'entrée ou de paramétrage	152
3.5. Modèle de résultats	154
4. Application sur une instance	156
4.1. Organisation prévue	157
4.2. Retour d'expérience	159

	Table des matières	V
5. Conclusion		160
<i>Annexes</i>		<i>171</i>
1. Modèle de simulation Java – calcul des dates		171

Introduction générale

A l'heure actuelle où le contexte de crise économique est présent dans tous les médias, le secteur de la santé n'en est pas moins épargné. Depuis plusieurs années, nous pouvons tous constater que la sécurité sociale est en déficit et que ce déficit s'agrandit d'années en années passant de 2,5 milliards d'euros en 1990 à 20,3 milliards d'euros en 2010. Différentes actions ont été menées pour réduire le déficit comme le plan hôpital 2007 dont les principaux objectifs sont de :

- moderniser les établissements de santé par une relance des investissements,
- mettre en place la tarification à l'activité,
- rénover les modes d'achat des hôpitaux,
- organiser un réseau de sanitaire simplifié, déconcentré et rénové,
- mettre en œuvre une coopération sanitaire.

La tarification à l'activité (T2A) est un nouveau mode de financement des hôpitaux. Elle définit le coût d'une hospitalisation qui servira de base à l'évaluation du financement d'un établissement en fonction du volume d'activités réalisées.

Depuis ce plan hôpital 2007, un autre a été lancé : le plan hôpital 2012 qui vise à consolider les objectifs du plan précédent tout en développant la mise en place des systèmes d'information hospitaliers et en assurant la mise aux normes de sécurité des bâtiments (normes antisismiques et désamiantage). La dernière action en date est la loi « Hôpital, patients, santé et territoire » adoptée le 23 juin 2009. Cette loi met en place, organise et structure le système de santé à différents niveaux. Au niveau du pilotage du système de santé territorial, les agences régionales de santé (ARS) sont mises en place. Au niveau des établissements de santé, cette loi renforce les pouvoirs et l'autonomie des chefs d'établissement qui seront nommés au conseil des ministres. Les établissements de santé pourront embaucher des praticiens issus du secteur privé et les rémunérer en tenant compte de leur activité au sein de l'hôpital. La loi préconise également la mise en place de système de coopération entre les établissements publics et privés en créant des groupements de coopération sanitaire (GCS). Les hôpitaux doivent donc faire face à de nombreux défis de plus en plus importants pour leur survie. Au travers de ces défis, transparaissent deux objectifs contradictoires que doit relever le système hospitalier : l'amélioration de la qualité des soins apportés au patient et la rentabilité qui passe par la réduction des coûts.

Face aux défis que doit relever le réseau de santé, l'amélioration des activités logistiques est l'une des pistes de solution à explorer pour non seulement réaliser des économies mais également libérer le personnel soignant et lui permettre de se consacrer davantage à sa vocation principale : les soins aux patients. En effet, la logistique hospitalière a un rôle de soutien incontournable pour le bon fonctionnement des services composant l'hôpital. Son rôle participe à la réduction des coûts (diminution des stocks,...) mais également à une fonction structurante de l'organisation des services de soins (gestion de stocks, organisation des livraisons,...).

Le Centre Hospitalier Universitaire de Clermont-Ferrand n'échappe pas à ce contexte et aux enjeux que doivent relever les établissements de santé. En 2004, le CHU était composé de quatre entités :

- l'hôpital gabriel montpied, situé sur le plateau saint jacques, comprenant 797 lits,

- l'hôtel dieu, situé en centre-ville, comprenant 537 lits,
- le centre médico-psychologique, également situé sur le plateau saint jacques, comprenant 282 lits,
- l'hôpital nord, situé à cébazat, comprenant 365 lits.

Dans le cadre du plan hôpital 2007, le CHU de Clermont-Ferrand a mis en œuvre différents travaux, tels que : la construction d'un nouvel hôpital, la réorganisation des services de soins, la fermeture de l'Hôtel Dieu, la centralisation des unités de production de repas, et de nouvelles prestations auprès d'établissements partenaires. Le site historique du CHU, l'Hôtel Dieu est un site classé, très enclavé et qui ne possède aucune possibilité d'extension. Les chantiers de rénovation et d'adaptation des locaux ne suffisent plus pour accueillir les patients et pour permettre aux équipes médicales de travailler dans de bonnes conditions. C'est avec ce bilan que l'équipe de direction a pris la décision de construire une nouvelle structure afin de remplacer l'hôtel Dieu vieillissant.

Afin de répondre aux nombreuses questions que peut soulever un projet de cette envergure, une cellule d'étude et d'analyse a été formée : l'Atelier de Modélisation. Cette cellule a été créée en 2004 à l'initiative de l'équipe de direction qui souhaitait faire face à une demande importante d'études et d'audits sur les conséquences d'un tel changement. Cette cellule est au centre d'un partenariat entre le CHU de Clermont-Ferrand et des partenaires universitaires tels que le laboratoire de recherche LIMOS (Laboratoire d'Informatique en Modélisation et Optimisation des Systèmes) de Clermont-Ferrand.

L'objectif de cet atelier est de modéliser l'ensemble des activités de l'hôpital et de construire, à partir des informations collectées auprès du personnel, plusieurs outils d'aide à la décision. L'atelier se compose de plusieurs groupes de travail qui permettent d'élaborer et d'approfondir le modèle de connaissance sur les activités de l'hôpital. Les groupes sont organisés autour de grandes thématiques :

- Les unités de soins et les urgences pédiatriques ont fait l'objet d'une thèse soutenue par J. Chauvet en décembre 2009 intitulée : « *Une méthodologie de modélisation pour les systèmes hospitaliers : application sur le Nouvel Hôpital d'Estaing* » (Chauvet, 2009) ;
- La planification des blocs opératoires et le brancardage ont fait l'objet d'une thèse soutenue par S. Rodier en Juillet 2010, intitulée : « *Une tentative d'unification et de résolution des problèmes de modélisation et d'optimisation dans les systèmes hospitaliers. Application au Nouvel Hôpital Estaing* » (Rodier, 2010) ;
- Le circuit du médicament a fait l'objet d'une thèse soutenue par J-C Huet en janvier 2011, intitulée : « *Proposition d'une méthodologie de réingénierie pour le contrôle par le produit de systèmes manufacturiers : application au circuit du médicament de l'hôpital* » (Huet J.-C. , 2011) ;
- L'organisation des flux des différents types de produits circulant à l'hôpital, fait l'objet de la thèse que nous présentons.

L'objectif de cette thèse s'inscrit dans l'optique d'amélioration des activités logistiques de l'hôpital. Elle concerne l'organisation des livraisons de produits tels que le linge, les repas ou encore les médicaments mais aussi les collectes de produits issus de l'activité de soins comme le linge sale, ... au sein de l'hôpital. Un service, le Pôle Logistique Intégré (PLI) a la responsabilité de l'organisation des transports entre les différentes entités du CHU (établissements internes, sites de production) et les entités externes. Cette étude a été menée en collaboration avec ce service.

Les différentes actions envisagées par le CHU de Clermont-Ferrand ont des effets sur l'organisation. Avant le début des différents chantiers d'extension, de centralisation ou de construction, 5 postes de

travail et 3 véhicules étaient nécessaires pour réaliser 42 activités de transport par jour. Après modification, le nombre de chauffeurs doit permettre de réaliser jusqu'à 70 activités par jour. L'objectif de notre étude est de proposer une organisation des activités de transport entre les différentes entités du CHU tout en prenant en compte un nombre important de ressources (véhicules, chauffeurs et contenants en ce qui concerne les ressources mobiles, et pour les ressources fixes : les lignes de production, les quais de chargement ou de déchargement et les aires de nettoyage). La prise en compte de toutes ces ressources implique de nombreuses contraintes. L'objectif est donc de construire un outil d'aide à la décision en vue d'aider les responsables à construire des organisations pour les différentes actions envisagée par le CHU.

Notre travail s'articule autour de 5 chapitres. Le chapitre 1 présente le contexte de notre étude, en commençant par définir la logistique hospitalière et ses enjeux afin de soutenir l'hôpital face aux transformations qu'il doit effectuer. Les activités liées à la gestion des flux matériels, informationnels, humains et physiques sont ensuite décrites. Le Centre Hospitalier Universitaire de Clermont-Ferrand connaît de grandes modifications. Nous décrivons les impacts de chacune d'entre elles et les problématiques qu'elles soulèvent. Ce chapitre donne un cadre à notre étude et permet ainsi de situer notre problématique.

Dans le chapitre 2, nous nous sommes intéressés aux transports d'un seul type de produit. Dans un premier temps, un seul type d'activité de transport (distribution de contenant propre ou retour de contenant sale) a été considéré. Le problème consiste à ordonnancer les activités en prenant en compte la disponibilité des ressources (chauffeurs, véhicules, quais de chargement/déchargement) dans l'objectif de minimiser le retard. Ce problème de transport a été modélisé comme un RCPSP avec profil de demande en ressource variable. Dans un second temps, la gestion simultanée des deux types d'activités nous a amenés à revoir la prise en compte des transports à vide, que nous avons alors modélisés comme des temps de montage dépendant de la séquence. Dans chaque cas, un modèle mathématique est proposé.

Le chapitre 3 s'intéresse aux transports des différents types de produits (repas, linge et médicament). Pour réaliser ces transports, plusieurs types de véhicules (un type de véhicule est utilisé pour un type de produit), un nombre donné de chauffeurs avec leur planning journalier et un nombre de contenants sont disponibles. De plus, pour chaque site nous prenons en compte le nombre de quais de chargement et de déchargement disponibles. L'objectif de ce chapitre est de proposer des organisations permettant de réaliser l'ensemble des transports tout en minimisant les retards et les heures supplémentaires. Ainsi, nous proposons une modélisation de notre problème qui prend en compte l'ensemble des éléments et contraintes en nous inspirant du Problème de livraison-collecte avec fenêtres de temps et charge complète. Un couplage métaheuristique-modèle de simulation est proposé.

Le quatrième chapitre prend en compte un élément supplémentaire et très important : la construction des plannings journaliers des chauffeurs. Les chauffeurs travaillent selon un planning de travail de 8 heures (pause incluse) composé de deux plages de travail séparées par une pause. La question posée est : comment construire des plannings journaliers qui respectent la durée journalière de travail et les pauses tout en s'assurant de pouvoir répondre aux objectifs précédents. Nous proposons un processus itératif mettant en œuvre plusieurs couplages entre un modèle mathématique, deux modèles de simulation (l'un avec un nombre de chauffeurs illimité, l'autre avec un nombre limité) et une métaheuristique.

Le cinquième et dernier chapitre concerne la présentation de l'outil d'aide à la décision intégrant les méthodes proposées dans les chapitres 3 et 4. Nous détaillons les fonctionnalités et l'architecture générale de cet outil qui permet de piloter les méthodes. Ainsi, nous présentons les interfaces d'entrée permettant le paramétrage des données et les interfaces de résultats qui permettent aux responsables de visualiser les résultats obtenus et de les valider. Les solutions présentées ont été mises en place dès mars 2010, nous commentons le retour d'expérience de cette mise en œuvre.

Chapitre 1 Contexte et problématique

1. Introduction

Les hôpitaux doivent faire face à des défis de plus en plus importants pour leur survie. Selon (Landry, Diaz, & Estampe, 2001), les dépenses des hôpitaux de différents pays (France, Pays-Bas) relatives à la logistique hospitalière représentent entre 31 et 34% du budget annuel d'un établissement. Un des leviers importants pour moderniser l'hôpital est la réorganisation. La logistique hospitalière est une fonction transversale qui permet à l'hôpital de satisfaire des objectifs contradictoires mais néanmoins essentiels : faire des économies et dégager du temps au personnel soignant pour les patients. La logistique hospitalière concerne de très nombreuses activités logistiques allant de la gestion des stocks à la réception des produits dans l'unité de soins en passant par les passations de commandes, la gestion des déchets,... Toutes ces activités sont actuellement effectuées par des acteurs très divers : infirmière, aide-soignante, agent des services hospitaliers, agent logistique,... Une étude menée par (Landry, Diaz, & Estampe, 2001) montre qu'une infirmière passe plus de deux heures à ces activités logistiques et l'Agent des Services Hospitaliers passe plus de la moitié de son temps à réaliser ces activités.

Ce bilan montre que la logistique hospitalière doit reprendre son rôle qui est de réaliser la majorité de ces tâches logistiques. De nombreuses études (Landry & Beaulieu, 2000), (Landry, Blouin, & Beaulieu, 2004), (Beaulieu & Patenaude, 2004) mettent en évidence que les hôpitaux doivent procéder à de nombreux changements tant dans l'organisation des flux que dans l'organisation des soins. Poussée par des changements importants dus à un environnement économique difficile, la logistique hospitalière connaît de grands bouleversements. Seulement il convient de procéder par étapes identifiées et connues. (Hassan, 2002) nous indique que, suite à des entretiens avec des responsables logistiques, il a réussi à dégager 10 priorités et tendances logistiques :

- revue et amélioration des processus,
- modernisation des systèmes d'information,
- développement et implantation d'échanges de données informatisés (edi),
- fusion ou partage de services avec d'autres établissements,
- rationalisation du nombre de fournisseurs,
- standardisation des produits,
- implantation de nouvelles techniques de réapprovisionnement,
- formation des employés du service des approvisionnements,
- sensibilisation du personnel médical,
- réduction du personnel.

Parmi les priorités identifiées par (Hassan, 2002), certaines concernent directement la logistique hospitalière comme la rationalisation du nombre de fournisseurs, la standardisation des produits, la mise en place de nouvelles techniques de réapprovisionnement et la réduction du personnel. La mutualisation des ressources de certains services comme les unités de production (blanchisserie, repas,...) remettent en cause l'approvisionnement, la gestion des stocks et les transports des produits. Notre étude est basée sur l'impact de la mise en œuvre d'un certain nombre de priorités telles que : mutualisation de ressources, mise en place de nouvelles techniques logistiques et réduction du personnel.

Nous allons donc commencer ce chapitre par donner quelques définitions de la logistique hospitalière et ses enjeux. Nous poursuivons par la description des actions envisagées par le Centre Hospitalier de Clermont-Ferrand, en décrivant ses principales modifications : la construction d'un nouvel hôpital, la réorganisation des services de soins, la fermeture de l'Hôtel Dieu, la centralisation des unités de production de repas, et de nouvelles prestations auprès d'établissements partenaires. Avant toute réorganisation, le CHU fonctionnait avec une organisation qui lui permettait d'assurer la quarantaine de transports à sa charge. Ces principaux chantiers imposent de repenser complètement les organisations en place et d'aider les responsables à organiser un nombre toujours plus important d'activités à réaliser. Pour finir, nous présentons la problématique soulevée par la mise en œuvre de ces différents chantiers.

2. Logistique hospitalière

La logistique hospitalière a évolué au fil des années tant d'un point de vue des responsabilités qu'elle assume, que des fonctions qu'elle assure. Sa définition a donc progressé suivant cette évolution. Nous allons, dans un premier temps, donner les définitions que nous avons trouvées dans la littérature afin d'appréhender l'importance de cette discipline. Puis nous décrirons les enjeux et défis que doit relever la logistique hospitalière pour satisfaire les contraintes imposées par les différents réformes et plans (plan hôpital 2007, 2012). Nous présentons ensuite les flux présents dans l'hôpital, tels que les flux humains (patients et personnels de l'hôpital), les flux de produits,... avant de décrire les activités liées à la logistique (production, approvisionnement, distribution, extraction). Nous présenterons également les différents modes de réapprovisionnement des unités de soins et leur impact sur les flux et les personnes qui les gèrent.

2.1. Définitions de la logistique hospitalière

La logistique hospitalière s'est fortement inspirée de la logistique industrielle pour organiser au mieux l'approvisionnement des unités de soins et l'évacuation des déchets issus des activités de soins et d'hébergement (Dallery, 2004). De nombreux hôpitaux ont commencé à mettre en place des techniques logistiques issues du secteur industriel comme le kanban, ou encore la définition de niveau de stock (Prashant, 1991), la planification des approvisionnements avec un MRP2 (Rossi-Turck, Wrincq, Danhier, & Menne, 2004), ... Nous avons donc plusieurs entités : fournisseurs, acheteurs, transporteurs et unités de soins, qui doivent communiquer entre elles afin d'assurer un haut niveau de service auprès des patients. La complexité de l'organisation de la logistique hospitalière réside dans la multiplicité de ses flux dont certains sont incompatibles (flux propres, sales, contaminés, stériles,...) et la nécessité d'améliorer trois facteurs antinomiques : la qualité des soins, l'accessibilité des services et les coûts des réseaux de santé.

Selon la commission hospitalière de l'ASLOG¹, la logistique hospitalière peut être définie comme :

*« La gestion des flux de patients, produits, services et des informations qui s'y rapportent depuis le fournisseur jusqu'au bénéficiaire, à un niveau défini de performance, au service de la **qualité** et de la **sécurité** des soins prodigués aux patients ».*

¹ ASLOG : ASsociation française pour la LOGistique

Cette définition permet de mettre en lumière l'ensemble des flux que doit gérer la logistique à savoir : les flux humains, matériels et informationnels. De plus, cette définition met l'accent sur le fait que l'hôpital n'a pas le droit à l'erreur et a une obligation de résultats.

Selon (Swinehart, Zimmerer, & Oswald, 1995), outre les prestations de soins, un établissement de santé s'articule autour de quatre fonctions logistiques centrales qui gèrent différents types d'intrants et d'extrants dans le but d'offrir des services répondant aux besoins des patients :

- La gestion interne qui regroupe l'acquisition, la réception et la distribution des différentes fournitures utilisées en soutien à la prestation de services et associées aux extrants intermédiaires et finaux ;
- La gestion de la demande qui consiste à prévoir, planifier et orchestrer l'utilisation des différentes ressources nécessaires pour répondre aux besoins en prestations hospitalières ;
- Les opérations et les services soutenant le patient pendant son séjour à l'hôpital. Ces opérations concernent l'ensemble des prestations hôtelières (linge, repas, ...) ;
- La gestion externe qui est associée aux activités de suivi médical du patient (dispensation des médicaments, actes médicaux, ...).

Parmi les fonctions détaillées par (Swinehart, Zimmerer, & Oswald, 1995), la gestion interne permet de gérer l'ensemble des flux de produits qui traversent l'hôpital, depuis leur achat jusqu'à la consommation et leur évacuation (déchets, par exemple). Ces fonctions logistiques font apparaître le nombre d'entités nécessaires pour la gestion des flux. Selon (Fenies, Gourgand, & Tchernev, 2004),

« un système hospitalier est devenu un système ouvert sur l'extérieur qui interagit avec des entités prestataires de services logistiques ou médicaux. La comparaison avec une Supply Chain est évidente : l'hôpital actuel, compte tenu de sa complexité grandissante, est plus proche d'une immense chaîne logistique dont les agents visent à satisfaire le patient que d'un système fonctionnant en vase clos. Nous définissons, par analogie avec les Supply Chain industrielles, l'hôpital contemporain comme une Supply Chain Hospitalière (SCH) »

Nous pouvons ainsi définir la Supply Chain Hospitalière comme un ensemble ouvert traversé par des flux humains, matériels, informationnels et financiers, composé d'entités variées et autonomes : fournisseurs, services hospitaliers (urgence, bloc opératoire, ...), prestataires logistiques, prestataires médicaux, ... Selon (Aleksy, André, Fenies, Gourgand, & Rodier, 2006), ces entités utilisent des ressources consommables en nombre limité (matériel, capital, ...) et coordonnent leurs actions par un processus logistique intégré afin d'améliorer prioritairement leur performance collective (satisfaction du patient, optimisation du fonctionnement du système hospitalier) mais aussi à terme leur performance individuelle (maximisation de la valeur créée par une entité).

« La logistique hospitalière regroupe l'ensemble des activités de conception, de planification et d'exécution permettant l'achat, la gestion des stocks et le réapprovisionnement des biens et services entourant la prestation de services médicaux » (Landry & Beaulieu, 2002).

La logistique hospitalière doit donc permettre de soutenir l'activité des unités de soins tout en respectant des critères contraignants comme les critères financiers. Nous allons maintenant décrire les enjeux de la logistique hospitalière.

2.2. Enjeux de la logistique hospitalière

La logistique a de nombreux défis à relever qui sont liés à de nombreux changements que doit effectuer l'hôpital. Les enjeux de la logistique hospitalière sont donc les suivants :

Enjeu structurel : les bâtiments doivent permettre d'accueillir les patients et permettre aux équipes soignantes de travailler dans de bonnes conditions. Une série de chantiers de rénovation et/ou de construction de nouveaux bâtiments a été lancée afin de répondre à cet enjeu comme le CHU de Lyon, le CHU de Tours ou encore le CH de Arras. Les impacts sur la logistique hospitalière sont nombreux, notamment sur les parcours des flux de produits à l'intérieur de ces nouvelles structures et sur l'approvisionnement des établissements (accès, plateforme de réception et d'expédition des produits) ;

Enjeu organisationnel : les unités de soins ont été créées historiquement et plusieurs unités ayant la même activité médicale pouvaient être gérées de manière distincte ce qui pouvait être source de dépenses. De même, chaque établissement dispose d'unité de production pour chaque type de produit. Par exemple, le centre hospitalier universitaire de Clermont-Ferrand composé de 4 établissements, est doté de 3 unités de restauration, de 2 pharmacies, ... A présent, les unités de soins sont regroupées par unités fonctionnelles et par pôles de spécialités. Ce regroupement est valable pour les unités techniques et administratives et implique alors à la fois une centralisation physique des ressources et la mutualisation des ressources (humaines, matériels,...). Pour les unités de soins, cela signifie qu'elles sont sur un même lieu (une seule destination pour les produits), pour les unités techniques (unités de production) cela veut dire qu'il n'y a plus qu'une seule adresse d'expéditeur. Bien que cela semble faciliter la gestion des flux de produits, le nombre de transport est alors augmenté ;

Enjeu fonctionnel : le personnel soignant sera libéré des tâches de rangement, de passation de commandes afin de leur permettre de dédier tout leur temps au patient. Ainsi les activités logistiques seront attribuées au personnel de ce service, augmentant ainsi le champ de ses responsabilités. Cette répartition des tâches aura un impact non négligeable sur le volume des activités réalisées jusqu'alors par le personnel soignant ;

Enjeu technologique : la dématérialisation de l'information a pour objectif d'éliminer au maximum les papiers afin d'éviter les pertes de transmission d'informations. De plus, cet enjeu est aussi de fluidifier la transmission de l'information de l'expéditeur jusqu'au destinataire en éliminant tous les intermédiaires, sources potentielles d'erreurs.

La sécurisation des circuits des produits par la mise en place de nouvelles technologies (par exemple puce RFID ou encore code à barres) permet ainsi d'assurer une traçabilité. Ainsi à chaque étape du parcours du produit, une mise à jour de l'état de la commande pourra être suivie que ce soit par l'unité consommatrice ou par l'unité de production (préparée, transport en cours, distribution en cours, reçue, manquante, en rupture, ...). L'approvisionnement de l'unité de soins n'est pas le seul parcours du produit qui sera suivi, la consommation peut être elle aussi tracée en permettant de savoir quel patient a reçu quel produit donné par quelle personne. La mise en place de ces technologies permet d'assurer une traçabilité du parcours du produit avant son arrivée à l'unité de soins et son parcours jusqu'au patient ;

Enjeu financier : la mise en place de nouvelles formes de contrôle des dépenses comme le contrat à l'équilibre budgétaire pour 2012 permet aux établissements de santé de veiller à leur bonne santé financière. La rationalisation des dépenses peut entraîner la mise en place de politique d'achats nouvelle qui auront une répercussion sur les transports de produits dans l'hôpital. Le financement des établissements est également contrôlé par la mise en place de la tarification à l'activité pour les hôpitaux. Le financement est donc attribué en fonction du volume des activités de soins.

Chaque enjeu que doit relever la logistique hospitalière a un impact plus ou moins important sur les responsabilités à prendre : assurer un niveau de service toujours élevé (la rupture de stock est interdite dans les unités de soins, pas de retard accepté,...) en mettant en œuvre la traçabilité des produits dans l'hôpital tout en utilisant le moins de ressources possible.

2.3. Les différents flux présents dans les établissements de santé

Comme nous l'avons vu précédemment, l'hôpital est un système ouvert traversé par de nombreux flux. (Dallery, 2004) propose une classification des flux existants dans les établissements de santé (Figure 1).

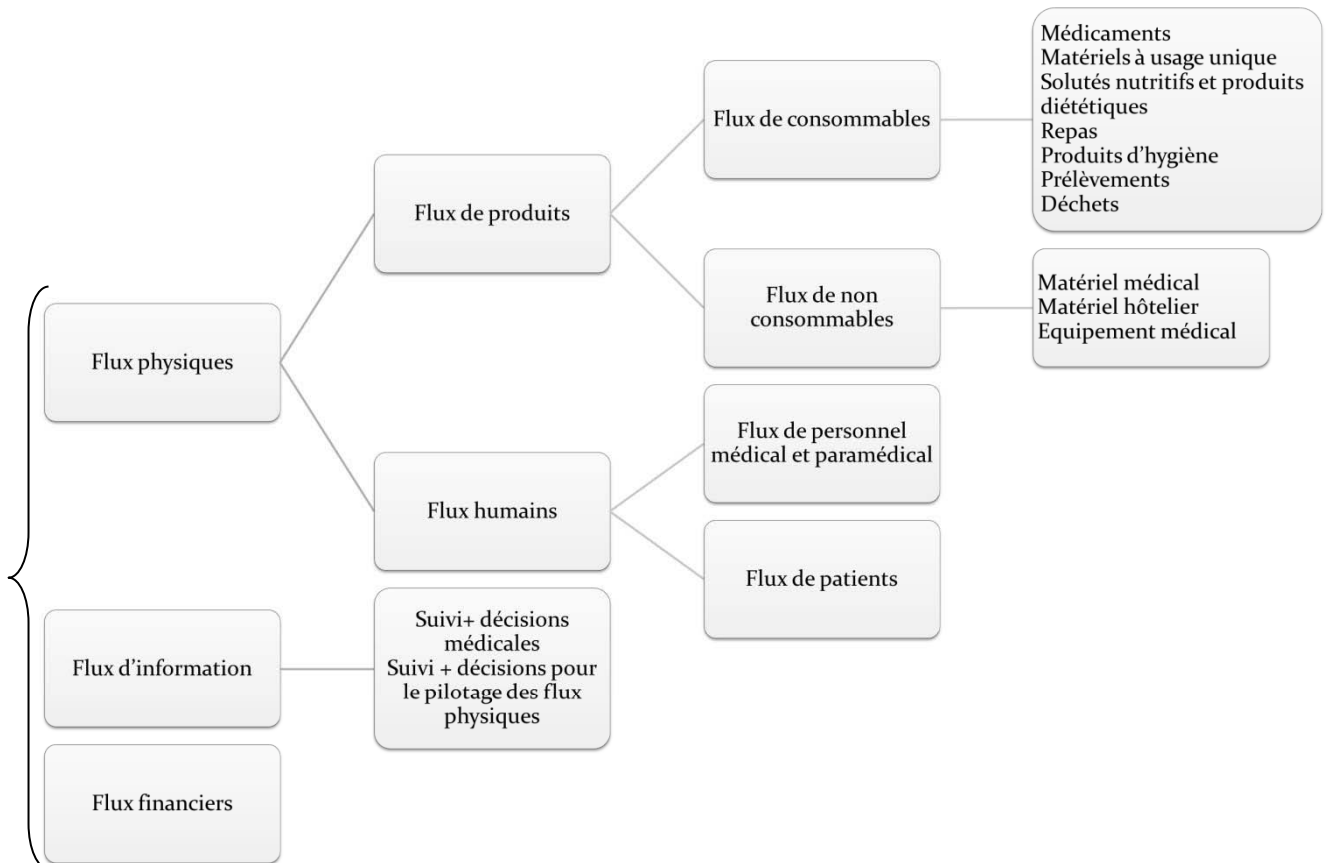


Figure 1 : Classification des flux existant dans les établissements de santé (Dallery, 2004)

La Figure 1 met en évidence trois catégories de flux : les flux physiques qui comprennent les flux humains et de produits, les flux d'information et enfin les flux financiers qui ne sont pas détaillés. Cette classification met en évidence l'importance des flux physiques par leur diversité. En effet, les flux de produits sont composés de 2 catégories : les produits non consommables et les produits consommables. Cette dernière catégorie représente une diversité de produits qui doivent être réapprovisionnés très régulièrement, car non réutilisables et périssables.

De nombreuses études s'intéressent à l'organisation d'un de ces flux (Hassan, 2002). Récemment, quelques études concernent l'organisation conjointe de trois de ces flux (Kergosien, 2010).

2.4. Les activités liées à la logistique

La logistique hospitalière doit assurer le bon écoulement des flux tout en assurant un soutien aux activités de soins. La logistique hospitalière comprend de nombreuses activités comme le propose (Chow & Heaver, 1994) réparties en trois catégories (Figure 2) :

- l'approvisionnement : processus d'achat et de gestion des stocks des différents produits,
- la production : processus de transformation tel que le traitement du linge, la fabrication des repas ou la stérilisation des instruments,
- la distribution (ou réapprovisionnement) : transport des produits transformés dans des contenants depuis les unités de production jusqu'aux zones de stockage avant l'utilisation auprès du patient.

Toutes ces activités sont représentées par la Figure 2.

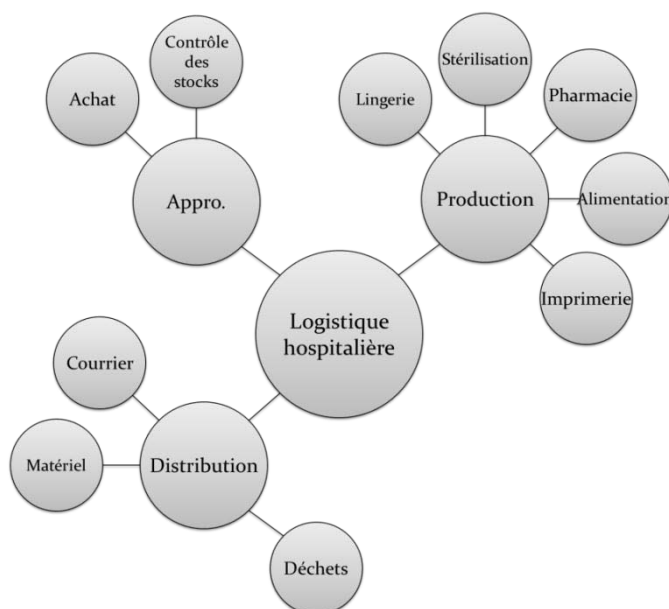


Figure 2 : Les différentes fonctions de la logistique selon (Chow & Heaver, 1994)

Étant donné les études actuelles, nous proposons d'ajouter (Figure 3) :

- L'extraction (des déchets), c'est le transport des déchets (ordures ménagères, Déchets d'Activités de Soins à Risques Infectieux et Assimilés (DASRIA), cartons, effluents, linge sale) depuis leurs zones de stockage dans les unités de soins jusqu'aux zones d'expédition ;
- La distribution des contenants tels que les chariots isothermes, les armoires et les rolls².

² Armoire grillagée munie de roulette

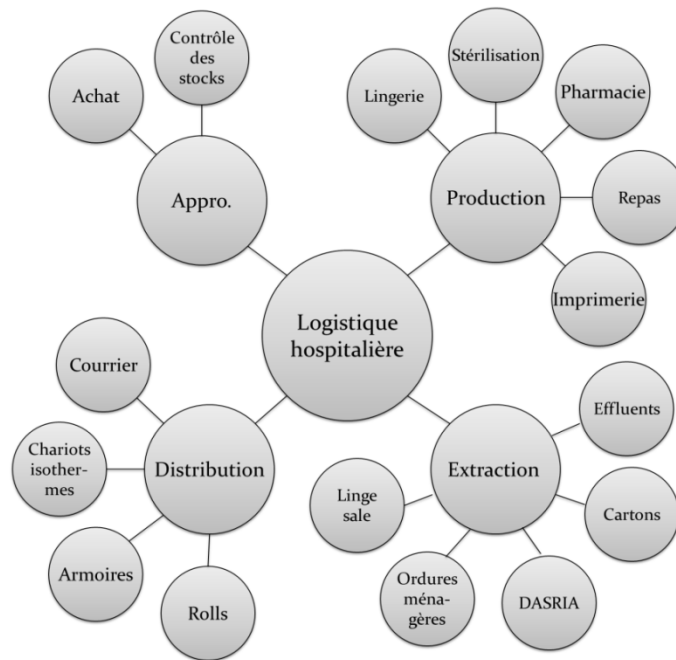


Figure 3 : Les différentes fonctions de la logistique hospitalière

(Rivard-Royer, Landry, & Beaulieu, 2001) proposent de définir l'activité d'approvisionnement comme le fait d'acheminer les produits jusqu'aux magasins centraux ou aux unités de soins. Ainsi, les auteurs proposent une décomposition en deux sous parties de l'activité d'approvisionnement :

- La chaîne d'approvisionnement interne : cette chaîne (interne) assure l'acheminement des produits depuis le magasin central jusqu'au local de stockage de l'unité de soins ;
- La chaîne externe : qui assure l'approvisionnement du magasin central depuis les unités de production ou des fournisseurs externes.

Nous pouvons donc distinguer deux circuits : un circuit qui vise à approvisionner les magasins centraux depuis l'extérieur et un circuit à l'intérieur de l'hôpital qui permet de transporter les produits depuis les magasins jusqu'aux locaux de stockage des unités de soins. Certains hôpitaux ne disposent pas de magasins centraux, ce système est appelé « stockless », selon (Rivard-Royer, Landry, & Beaulieu, 2001).

Comme le montre la Figure 4, la chaîne de réapprovisionnement de l'hôpital peut être vue comme l'enchaînement de deux cycles où les commandes de produits au magasin central déclenchent un flux de produits vers les unités de soins. (Blouin, Beaulieu, & Landry, 2001) proposent de découper le cycle de réapprovisionnement en quatre activités :

1. commander : faire un dénombrement des quantités aux unités de soins,
2. prélever : préparer les commandes des unités de soins au magasin central,
3. transporter : acheminer les commandes depuis le magasin central jusqu'aux unités de soins,
4. placer : ranger les produits dans l'unité de soins.

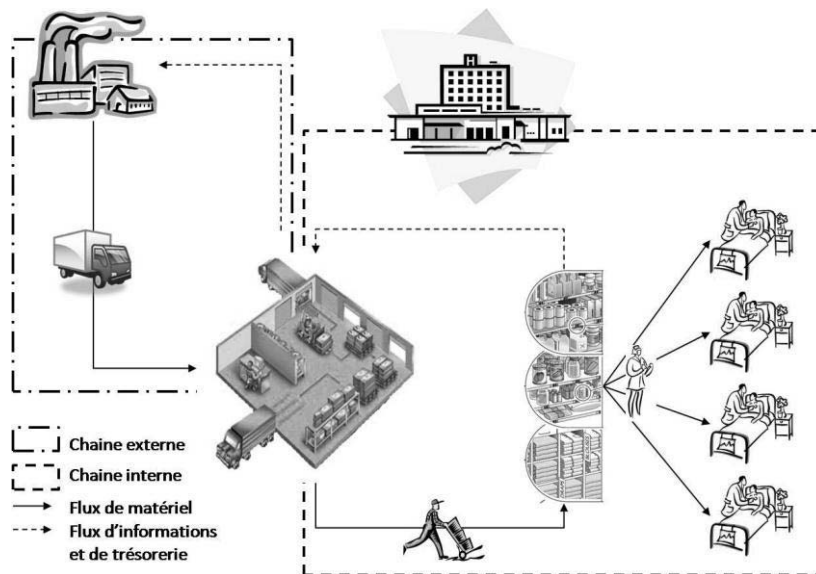


Figure 4 : Décomposition de la chaîne d'approvisionnement hospitalière selon (Rivard-Royer, Landry, & Beaulieu, 2001)

Que ce soit dans le cycle d'approvisionnement décrit par (Blouin, Beaulieu, & Landry, 2001) ou dans la description de l'activité d'approvisionnement de (Rivard-Royer, Landry, & Beaulieu, 2001), le retour des contenants utilisés pour l'approvisionnement des produits commandés au magasin central n'est jamais abordé. En effet, dans le cas de la pharmacie avec l'emploi de caissons fermés ou pour la blanchisserie avec l'emploi d'armoires de livraison, il peut être nécessaire également d'organiser leur retour. Nous obtenons donc un cycle d'approvisionnement avec une cinquième activité :

5. retourner : collecter les contenants vides (ou remplis dans le cas du linge sale par exemple).

2.5. Les différents modes de réapprovisionnement des unités de soins

Souvent, les auteurs travaillent sur l'amélioration des modes de réapprovisionnement en différents types de produits (repas, linge, médicaments, dispositifs médicaux stériles, fournitures médicales,...) des unités de soins. Une revue de la littérature montre qu'il existe au moins cinq modes de réapprovisionnement des unités de soins :

- Le système de réquisition : l'un des plus vieux systèmes existant dans les hôpitaux (Houssley, 1978). Le personnel soignant se charge de l'évaluation des besoins en fournitures, de la préparation des commandes, de la transmission des besoins et de la disposition des fournitures dans les systèmes d'entreposage ;
- L'échange de chariots : c'est une technique de réapprovisionnement qui a connu un essor de popularité au milieu des années 70 (Perrin, 1994). A l'époque, cette approche était perçue comme présentant de nombreux avantages par rapport au système de réquisition car elle éliminait la responsabilité des unités de soins dans la gestion des stocks et du réapprovisionnement et améliorait la gestion des stocks (Kovacs, 1984). Les produits sont placés sur un chariot qui constitue un stock. Ce chariot est remplacé par un chariot complet à une heure définie avec l'unité de soin ;
- L'approche par level : la popularité de l'échange de chariots a diminué d'une façon importante au fil des années pour laisser place à l'approche par level (Kovacs, 1984), (Kowaleski, 1980). Le manutentionnaire assure des tournées périodiques des unités de soins pour faire l'inventaire des produits à commander et réaliser la transmission des besoins. Puis, il assure la préparation de commande et la livraison aux unités de soins ;
- Le système plein-vide : (Landry & Beaulieu, 2000) rapportent que plusieurs établissements de santé européens ont recours au système plein-vide pour assurer le réapprovisionnement des

unités de soins. Ce système fonctionne de la même façon que le mode décrit précédemment, excepté en ce qui concerne la gestion du stock. En effet, pour ce mode, les produits sont rangés dans deux casiers. Lorsque l'un des deux est vide, la personne chargée de la commande lance la commande et le temps que l'unité de soins est réapprovisionnée, le second casier est consommé ;

- Le stockless hybride : approche américaine proposée par les distributeurs aux établissements de santé selon laquelle le distributeur trie et emballe les produits en fonction des besoins spécifiques de chaque unité (Rivard-Royer, Landry, & Beaulieu, 2001).

Ces différents modes de réapprovisionnement des unités de soins ont un impact plus ou moins important sur la charge de travail des manutentionnaires. Dans le Tableau 1, nous avons renseigné, pour chaque mode de réapprovisionnement, l'acteur en charge de chaque activité du cycle de réapprovisionnement.

Mode de réappro.	Commander	Prélever	Transporter	Placer	Retourner
Système de réquisition	Pers. Soig.	Manut.	Manut.	Pers. Soig.	Manut.
Echange de chariots	Manut.	Manut.	Manut.	Manut.	Manut.
Approche par level	Manut.	Manut.	Manut.	Manut.	Manut.
Système plein-vide	Pers. Soig./Manut.	Manut.	Manut.	Manut.	Manut.
Stockless hybride	Dist.	Dist.	Dist.	Dist.	Dist.

Tableau 1 : Acteurs intervenant suivant le mode de réapprovisionnement

Dans ce tableau, *Pers. Soig.* désigne le personnel soignant appartenant à l'unité de soins, *Manut.* les manutentionnaires appartenant au service logistique et enfin *Dist.* le personnel travaillant pour un distributeur n'appartenant pas à l'hôpital.

2.6. Les niveaux de décision

De nombreux hôpitaux en France, en Europe et dans le monde, mènent des études afin de répondre aux différentes contraintes qu'impose l'environnement économique. Les décisions d'aménagement, de changement ou plus radicalement de création de nouvelles organisations logistiques se prennent à différents niveaux (Aleksy, Chabrol, Chauvet, & Fenies, 2006) :

- Stratégique qui correspond au problème de conception et de construction du réseau de la SCH ;
- Tactique qui correspond à l'utilisation du réseau, et à l'adéquation ressources/besoins ;
- Opérationnel qui concerne le pilotage de la SCH à court terme.

Ces différents horizons demandent des niveaux de granularité différents pour toute étude de modélisation réalisée pour construire des outils d'aide à la décision. Il est intéressant de coupler la vue temporelle avec les différents types de modélisation et de simulation envisageables sur les SCH. Pour ce faire, nous reprenons les approches dégagées par (Chabrol, Chauvet, Fenies, & Gourgand, 2006). Ainsi trois approches permettent de caractériser dans le cadre d'une approche de modélisation par les flux, les types de modélisation : macroscopique, mésoscopique et microscopique. Le tableau montre que l'on peut coupler ces trois approches avec les différents horizons temporels.

	Macroscopique	Mésoscopique	Microscopique
Stratégique	Conception de SCH Exemple : conception d'une SCH (Abouïssa, Nicolas, Benasser, & Cherkouk, 2003)	Conception de processus Exemple : Conception du processus d'approvisionnement (Lapierre & Ruiz, 2004)	Conception d'activité Exemple : Conception de l'activité Approvisionner en pansements (Van Donk, 20003)
Tactique	Configuration de SCH Exemple : planification des ressources en fonction des besoins pour l'ensemble de la SCH (Brigl, et al., 2004)	Configuration de processus Exemple : planification du processus opératoire (Guinet & Chaabane, 2003)	Configuration d'activité Exemple : détermination des ressources pour l'approvisionnement en pansements (Syi & Shih, 2003)
Opérationnel	Pilotage de SCH Exemple : gestion des interactions entre les différents aléas sur l'ensemble de la SCH (Lanzola, Gatti, Falasconi, & Stefanelli, 1999)	Pilotage de processus Exemple : modification du planning du processus opératoire en fonction d'aléas (urgences,...) (Doheny & Fraser, 1996)	Pilotage d'activité Exemple : ajustement journalier du personnel infirmier en fonction des aléas pour l'activité anesthésie (Bard & Purnomo, 2005)

Tableau 2 : le couplage horizon temporel et approche de modélisation, selon (Aleksy, Chabrol, Chauvet, & Fenies, 2006)

La gestion des stocks de médicaments est une question qui relève à la fois du niveau stratégique où il s'agit de définir un niveau de stock (Prashant, 1991), ou de choisir un mode de gestion de stock avant de le mettre en place (Rivard-Royer, Landry, & Beaulieu, 2001) et du niveau opérationnel lorsque (Burns & Tucker, 2001) étudie l'impact sur les stocks de 3 politiques de gestion des stocks. (Epstein, 2000) proposent une étude financière stratégique sur deux modes d'inventaires (le juste à temps et la quantité économique de commande) qui ont un impact direct sur le mode de gestion des stocks.

Un sujet très étudié concerne les politiques d'approvisionnement des unités de soins. Nous retrouvons ce sujet sur trois niveaux décisionnels :

- Stratégique (Van Merode, Groothuis, & Hasman, 2004) étudient la possibilité de mettre en place un ERP afin de gérer les stocks, les commandes... et la possibilité de mettre en œuvre différents modes de réapprovisionnement des unités de soins ;
- Tactique : (Roth & Van Dierdonck, 1995) proposent de poser les bases de la planification des approvisionnements en médicaments avec un MRP2 en un parallèle possible entre l'utilisation du MRP2 dans le secteur industriel et dans le secteur hospitalier, (Rossi-Turck, Wrincq, Danhier, & Menne, 2004) proposent une étude sur la gestion de l'approvisionnement de dispositifs stériles au bloc opératoire à l'aide d'un MRP2 ;
- Opérationnel : la gestion des réapprovisionnements des blocs fait aussi l'objet de l'étude de (Di Martinelly, 2008), dans laquelle la consommation des produits est liée à l'activité du service. Ainsi, l'auteur propose de gérer les approvisionnements en fonction de l'activité et donc du flux de patients. Les blocs opératoires représentent un service où de nombreux enjeux se mêlent, tels que : la sécurisation du circuit du médicament, la mise en place de nouvelles technologies... c'est dans ce contexte que (Hassan, Baboli, Guinet, Leboucher, & Brandon, 2005) réalisent une étude sur la gestion des ressources matérielles pour la distribution des médicaments aux blocs opératoires.

3. Le contexte au Centre Hospitalier de Clermont-Ferrand

Le CHU de Clermont-Ferrand évolue dans le cadre des réformes hospitalières (modernisation des locaux, sécurisation du circuit des médicaments,...) en s'adaptant au contexte économique difficile.

Le CHU s'inscrit dans cette nouvelle politique en envisageant et en mettant en place de grands changements que nous allons détailler après avoir présenté la situation du CHU avant toute réorganisation. Le premier de ces changements concerne la modernisation des locaux avec la construction du Nouvel Hôpital Estaing. Ce changement se déroulera suivant 3 phases (étalées sur un mois) qui permettront de transférer les unités de soins du vieux site de l'Hôtel Dieu à L'Hôpital Estaing. Le second changement concerne la centralisation des unités de production des repas qui sera effectuée en deux phases : fermeture de la cuisine de l'Hôtel Dieu et transfert de son activité sur l'unité centrale de production alimentaire et fermeture puis transfert de la cuisine relais de l'hôpital de Gabriel Montpied sur l'unité centrale. L'ensemble de ces changements impacte l'organisation des transports de produits tant par la quantité de contenants à déplacer que par la fréquence des passages des véhicules sur les sites. Ainsi, nous allons expliquer l'évolution du nombre de transports (de 40 à 71) à organiser pour chaque phase.

3.1. Situation avant la réorganisation

Avant la réorganisation, le Centre Hospitalier Universitaire de Clermont-Ferrand se composait de 1981 lits pour 47 services médicaux répartis dans quatre entités distinctes :

- L'Hôpital Gabriel Montpied (GM), situé sur le plateau Saint-Jacques, comprenant 797 lits ; il conserve des possibilités d'évolution et d'extension ;
- L'Hôtel Dieu (HD), situé en centre-ville, comprenant 537 lits ; il était très enclavé, en fort dénivelé, et ne possédait aucune possibilité d'évolution car il était situé sur un site historique. Il était principalement voué à la mère et à l'enfant ;
- Le centre médico-psychologique (CMP), également situé sur le plateau Saint-Jacques, comprenant 282 lits ;
- L'Hôpital Nord, regroupant les unités de gériatrie, situé à Cébazat, comprenant 365 lits.

Chaque site est composé de pôles qui eux-mêmes sont composés d'unités fonctionnelles. Il existe deux types de pôles :

- les pôles médicaux dans lesquels nous retrouvons l'ensemble des unités de soins ayant la même spécialité (digestif, pédiatrique, ...). Les unités fonctionnelles appartenant aux pôles médicaux peuvent être considérées comme des unités de consommation ;
- Les pôles techniques qui regroupent des unités fonctionnelles telles que des unités chargées des achats, de la maintenance des équipements mais aussi des transports, de la production des repas, de la pharmacie, de la blanchisserie.

Nous nommons :

- Unités de consommation : les unités fonctionnelles qui utilisent les produits nécessaires à leur activité ;
- Unités de production : les unités fonctionnelles qui ont en charge l'approvisionnement des unités de consommation ;
- Unité de transport externe (entre deux sites) : les unités en charge de l'acheminement des produits entre les unités de production et les sites de consommation ;
- Unité de transport interne (à l'intérieur d'un site) : les unités en charge de l'acheminement des quais de déchargement des sites de consommation aux unités de consommation.

Parmi tous les flux de produits, nous distinguons deux catégories : les produits dits « propres » et les produits dits « sales ». Parmi les produits propres, nous trouvons :

- les médicaments, c'est-à-dire l'ensemble des produits gérés par la pharmacie,
- les dispositifs médicaux stériles issus de l'unité de stérilisation,

- les produits hôteliers, comme les confitures, les petits pots pour enfants...,
- les fournitures de bureau,
- le linge propre,
- les repas...

En ce qui concerne les produits sales, nous retrouvons tous les déchets issus de l'activité de soins comme :

- les plateaux repas consommés,
- le linge sale, placé dans différents sacs,
- les déchets dits ménagers (restes de repas, ...),
- les déchets à risque infectieux (issus directement des activités de soins),
- les dispositifs médicaux utilisés...

3.1.1. L'unité de transport externe

Cette unité est ouverte 7 jours sur 7 et assure le transport de tous les produits depuis les unités de production jusqu'aux sites de consommation, puis le retour des contenants jusqu'aux unités de production afin qu'ils soient réutilisés.

Une flotte de véhicules permet d'assurer le transport des médicaments, du linge, des repas,... à réaliser entre les unités de production et les unités de consommation. La flotte de véhicules est très hétérogène :

- Des grands véhicules frigorifiques qui servent uniquement au transport des repas ;
- Des petits véhicules frigorifiques qui peuvent accéder aux sites particulièrement difficiles d'accès et qui servent uniquement au transport des repas ;
- Des véhicules « standards » qui peuvent assurer le transport des médicaments ou du linge (propre ou sale).

Les chauffeurs peuvent conduire n'importe quel véhicule, à condition qu'ils aient un permis de conduire poids lourds. Le couple (chauffeur, véhicule) réalise des activités de transport qui 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.

Une activité de transport consiste à charger sur un quai de chargement un contenant dans un véhicule sur un site, à le transporter jusqu'à sa destination et le livrer. Chaque véhicule peut transporter les produits prévus pour un ou plusieurs sites de consommation. Une fois les produits livrés et/ou consommés (ou placés dans un stock), les contenants, utilisés pour le transport, sont récupérés et déchargés sur le quai de déchargement pour être réutilisés par le site de production.

3.1.2. L'unité de transport interne

Cette unité assure le transport des produits des quais de déchargement jusqu'aux unités de soins, puis des unités de soins aux quais d'expédition. Une unité de ce type est présente sur chaque site hospitalier. Cette unité est ouverte 7 jours sur 7, selon des horaires propres à chaque site. L'effectif consacré à cette unité est variable en fonction de la taille du site et du nombre d'activités gérées par les agents.

Pour assurer le transport de l'ensemble de ces produits, les agents ont à leur disposition un large éventail de contenants, comme des rolls, des bennes, des caissons,... et de moyen de manutention

comme des tracteurs, des transpalettes et des monte-charges. Leur travail consiste à assurer l'acheminement des contenants livrés par les véhicules jusqu'aux unités de soins et de ramener les contenants sales jusqu'aux quais d'expédition. Les agents de l'unité de transport interne font le lien entre les unités de soins et l'unité de transport externe.

3.1.3. Description du fonctionnement des unités de production

Il existe plusieurs unités de production différentes, parmi lesquelles : la blanchisserie, l'unité Centrale de production alimentaire et la pharmacie. Pour préparer les produits, les sites de production disposent de lignes de production, et, pour nettoyer les contenants récupérés dans les sites de consommation, les sites disposent d'aires de nettoyage. L'ensemble des ressources (lignes de production, aires de nettoyage, quais, contenants, véhicules et chauffeurs) sont en nombre limité et soumis à des plannings.

Pour chacune des unités de production, nous décrivons leur structure (le nombre de quais de chargement, de déchargement, le nombre de ligne de production et d'aires de nettoyage), leur fonctionnement et les acteurs responsables de l'acheminement des produits depuis ces unités de production jusqu'aux unités de soins.

3.1.3.1. La blanchisserie

La blanchisserie est en charge du traitement du linge sale et du réapprovisionnement en linge propre des unités de consommation. Cette unité fonctionne 5 jours sur 7 et est ouverte de 6h à 15h. Pour traiter le linge sale, la blanchisserie dispose pour la réception de linge sale de deux quais de déchargement et d'un quai de chargement pour l'expédition du linge propre. Cette unité dispose également de quatre lignes de production (remplissage des armoires) et de deux aires de nettoyage (tunnel de lavage). Elle se situe à Cébazat, c'est-à-dire à quelques kilomètres de Clermont-Ferrand. Nous trouvons deux catégories de linge : le linge hôtelier et les tenues du personnel.

Le traitement du linge diffère en fonction de son degré infectieux et du type de tissus traité. Pour différencier les modes de traitement, le linge sale est placé dans des sacs de couleurs différentes par le personnel des unités de consommation, indiquant ainsi le type de traitement qu'il doit subir. Il existe 6 couleurs différentes, donc 6 modes de traitement différents impliquant des durées de traitement différents. Les sacs de linge sale sont placés dans des armoires qui sont vidées par des agents. Les sacs sont suspendus sur un réseau qui permet de faire un tri des différents sacs. Deux tunnels de lavages sont disponibles et permettent de traiter simultanément le linge. L'approvisionnement du linge est géré informatiquement par un agent chargé de l'ordonnancement des sacs dans les tunnels. Une fois lavé, le linge est acheminé vers des machines chargées du séchage et ensuite du repassage. Une fois repassé et plié, le linge est emballé et trié dans les armoires par des agents.

Le linge est préparé à la blanchisserie pour chaque unité de consommation dans une ou plusieurs armoires et elles sont ensuite transportées par véhicule jusqu'aux différents sites de consommation. Les véhicules qui assurent l'acheminement des armoires appartiennent à l'unité des transports externes. Une fois livré sur le site de consommation, le linge propre est ensuite pris en charge par des agents de l'unité des transports internes jusqu'aux unités de soins. Le linge propre est utilisé, puis repart dans ces mêmes armoires jusqu'à la blanchisserie. Le retour des armoires de linge sale sur les quais du site de consommation est assuré par les transports internes et le transport des armoires du site à la blanchisserie est assuré par l'unité de transport externe.

Chaque unité de consommation est livrée en fonction de son besoin. Une unité de soins peut être livrée tous les jours, comme les blocs opératoires et la stérilisation. En revanche d'autres ne sont li-

vrées qu'une à deux fois par semaine, comme par exemple la morgue ou l'imagerie. Les unités qui fonctionnent 7 jours sur 7 ont besoin de linge propre tous les jours, y compris les jours où la blanchisserie sera fermée. Ainsi, en prévision du week-end et des jours fériés, il est livré chaque jour ouvré une quantité de linge plus importante que les besoins journaliers réels. De plus, pendant le week-end et les jours fériés, ces unités consommeront également du linge qui est acheminé jusqu'aux quais (tâche effectuée durant le week-end), transporté jusqu'à la blanchisserie (tâche effectuée du lundi au vendredi uniquement) et traité. Nous observons alors une augmentation du nombre de transports pour le linge sale en début de semaine. Cette variation dans les besoins entraîne une variation de nombre de transports à effectuer chaque jour.

3.1.3.2. L'unité centrale de production alimentaire

Cette unité a la charge de la confection des repas pour le personnel et les patients. Cette unité est ouverte 7 jours sur 7 et assure l'approvisionnement en repas de l'ensemble des unités de consommation. Parmi les unités de consommation, nous trouvons les unités de soins et les restaurants du personnel (médical ou non). L'unité fournit les repas midi et soir pour les unités des soins (patients) et les repas du midi pour les restaurants du personnel. L'unité centrale de production alimentaire (UCPA) est composée de :

- l'unité centrale de production alimentaire située sur le site de Gabriel Montpied,
- la cuisine relais du site de Gabriel Montpied,
- la cuisine relais du site de l'Hôtel Dieu,
- la cuisine relais du site de l'Hôpital Nord.

L'UCPA dispose de 2 quais de chargement, de 1 quai de déchargement, 2 lignes de production et 1 aire de nettoyage.

Les petits déjeuners sont préparés dans les unités de soins par le personnel et distribués aux patients. Les sites de Gabriel Montpied, de l'hôpital Nord et de l'Hôtel Dieu disposent d'une cuisine relais qui a pour tâches la remise en température des repas pour le restaurant du personnel et la mise en plateau des repas pour les patients.

Les repas sont acheminés en deux temps :

- L'UCPA fournit aux cuisines relais des produits en liaison froide³. Les produits sont conditionnés dans des cagettes et des plats et transportés par véhicules frigorifiques. Les cagettes et les plats servant au transport des repas sont réutilisés et doivent donc être ramenés à l'UCPA ;
- Les repas sont acheminés à partir des cuisines relais aux unités de soins dans des navettes isothermes contenant des plateaux repas par les agents de l'unité de transport interne.

Les besoins en transport pour les repas sont connus et fixes pour tous les jours de la semaine du lundi au dimanche.

3.1.3.3. La pharmacie

Cette unité doit approvisionner l'ensemble des unités de soins qui ont besoin de médicaments, de dispositifs médicaux, de solutés,... Cette unité est ouverte du lundi au vendredi et des systèmes

³ La liaison froide implique un transport des denrées alimentaires dans des conditions de température particulière : entre 0 et 3°C, selon l'arrêté du 9 mai 1995.

d'astreintes permettent de répondre aux besoins urgents durant les nuits et le week-end. Les dépannages sont acheminés par des navettes motorisées appartenant à l'unité des transports externes. La pharmacie est composée de :

- une pharmacie centrale située sur le site Gabriel Montpied,
- une antenne de dispensation située sur le site de l'Hôtel Dieu,
- une unité centrale de stérilisation située sur le site Gabriel Montpied.

La pharmacie gère l'approvisionnement, le stockage, la préparation et la dispensation des produits pharmaceutiques (les solutés, les gaz médicaux, la nutrition parentérale⁴, les médicaments, les cytostatiques⁵ et les stupéfiants) et assimilés (dispositifs médicaux stériles).

L'antenne située à l'Hôtel Dieu est ouverte 5 jours sur 7 et assure le réapprovisionnement des unités de consommation de ce site. Les dépannages sont assurés par la pharmacie centrale située sur le site de Gabriel Montpied. Les produits sont acheminés par véhicule entre les deux sites. Cette antenne sera déménagée à l'Hôpital Estaing.

La stérilisation est ouverte 7 jours sur 7 de 5h à 23h pour nettoyer, désinfecter et stériliser les dispositifs médicaux stériles (DMS). Ces produits sont utilisés dans les blocs opératoires et quelques unités de soins. L'unité de stérilisation du site de Gabriel Montpied traite les DMS utilisés par les unités de consommation situées sur ce même site.

Le fonctionnement des unités pharmaceutiques (pharmacie centrale et antenne) est le même : les unités de soins passent une commande à la pharmacie de leur site qui leur prépare ensuite les produits. La pharmacie centrale, comme l'antenne, prépare les commandes de chaque unité de soins après avoir reçu les commandes (prescription) soit par informatique soit sur papier. Chaque commande est préparée par des préparateurs qui remplissent des contenants (rolls plombés) pour chaque unité de soins. La pharmacie centrale a pour mission, en plus de gérer les médicaments des unités de soins de l'hôpital de Gabriel Montpied, le réapprovisionnement de l'antenne.

Les médicaments, à destination de l'antenne, sont livrés dans des rolls plombés qui contiennent des glacières, des caissons,... La livraison de l'antenne est réalisée deux fois par jour par l'unité de transport externe. Une fois livrés, les médicaments sont rangés et stockés dans les locaux de l'antenne jusqu'à ce qu'ils soient préparés pour les unités de soins.

La pharmacie est composée d'une ligne de production, d'une aire de nettoyage et les quais utilisés pour cette unité sont ceux de l'hôpital de Gabriel Montpied.

3.1.4. Les unités de consommation

Les unités de consommation sont les unités qui commandent des produits auprès des unités de production, nous pouvons en distinguer plusieurs catégories :

- Les unités de soins hébergent les patients et ont besoin de tous types de produits comme du linge, des médicaments et des repas (la plupart est ouverte 7 jours sur 7, 24 heures sur 24) ;

⁴ Nutrition par voie intraveineuse

⁵ Médicaments utilisés dans le traitement immunosuppresseur

- Les blocs opératoires sont les lieux où le patient subit une intervention chirurgicale, par conséquent leurs besoins se concentrent uniquement autour du linge et des médicaments (bloc ouvert 7 jours sur 7) ;
- Les urgences où sont accueillis les patients ont besoin de linge et de médicaments (ouverte 7 jours sur 7, 24 heures sur 24) ;
- Les consultations qui ne consomment que du linge et des médicaments (ouvertes 5 jours sur 7, de 8h à 17h) ;
- L'imagerie où sont réalisés différents actes comme la radio, le scanner, l'IRM et dont les seuls besoins sont le linge et les médicaments (ouverte 7 jours sur 7) ;
- Les autres unités comme le restaurant du personnel qui ne nécessitent que des repas et du linge (ouverte 5 jours sur 7 uniquement pour les repas du midi de 11h30 à 14h).

Les besoins sont donc très variés en fonction des unités de consommation et le degré de priorité pour leur réapprovisionnement est variable. Le plus souvent chacune de ces unités a des locaux spécifiques lui permettant de stocker les produits : l'office alimentaire pour les repas, les locaux de linge propre, de linge sale et de déchets, de pharmacie, ... Pour chaque produit, un circuit lui est dédié :

- Les repas sont contrôlés (certains patients peuvent être soumis à des régimes particuliers), remis à température et distribués. Les plateaux sont ensuite récupérés pour être renvoyés aux cuisines ;
- Le linge est distribué dans les unités de soins qui contrôlent la réception lors du rangement du linge dans les locaux de linge propre. Une fois le linge sale récupéré dans les différents locaux de l'unité de soins, il est placé dans des sacs puis ces sacs sont stockés dans des rolls grillagés avant de retourner à la blanchisserie ;
- Les médicaments sont contrôlés lors de leur réception, puis rangés dans le local pharmacie. Une fois la prescription du médecin rédigée, les infirmières préparent les médicaments pour chaque patient et les administrent.

Pour chaque produit, les commandes sont assurées par le personnel soignant qui effectue un inventaire avant de préparer sa commande. Un cas particulier pour les repas : ce sont les diététiciens qui s'occupent de la commande. Les seuls acteurs qui voient les unités de consommation sont les agents de l'unité de transport interne.

3.1.5. Périmètre de l'étude

Nous avons présenté l'ensemble des flux existant au sein de l'hôpital. Dans le cadre de notre étude nous nous intéressons aux transports des produits de l'UCPA, de la pharmacie centrale et de la blanchisserie. Les produits concernés par cette étude sont les repas, le linge propre et sale, les médicaments et les contenants sales provenant des repas et des médicaments. Nous excluons donc les produits provenant du Centre d'approvisionnement Logistique (charge de l'approvisionnement des produits hôteliers et fournitures de bureau aux unités de consommation) et de la stérilisation (dispositifs médicaux stériles et utilisés). Nous ne prenons pas en compte les activités de l'unité de transport interne et les activités liées à l'évacuation des déchets. Nous avons ajouté dans notre périmètre les établissements partenaires : Hôpital de Riom, Clémentel et Sainte Marie. Nous présentons la localisation géographique des sites concernés par notre étude dans la Figure 5.

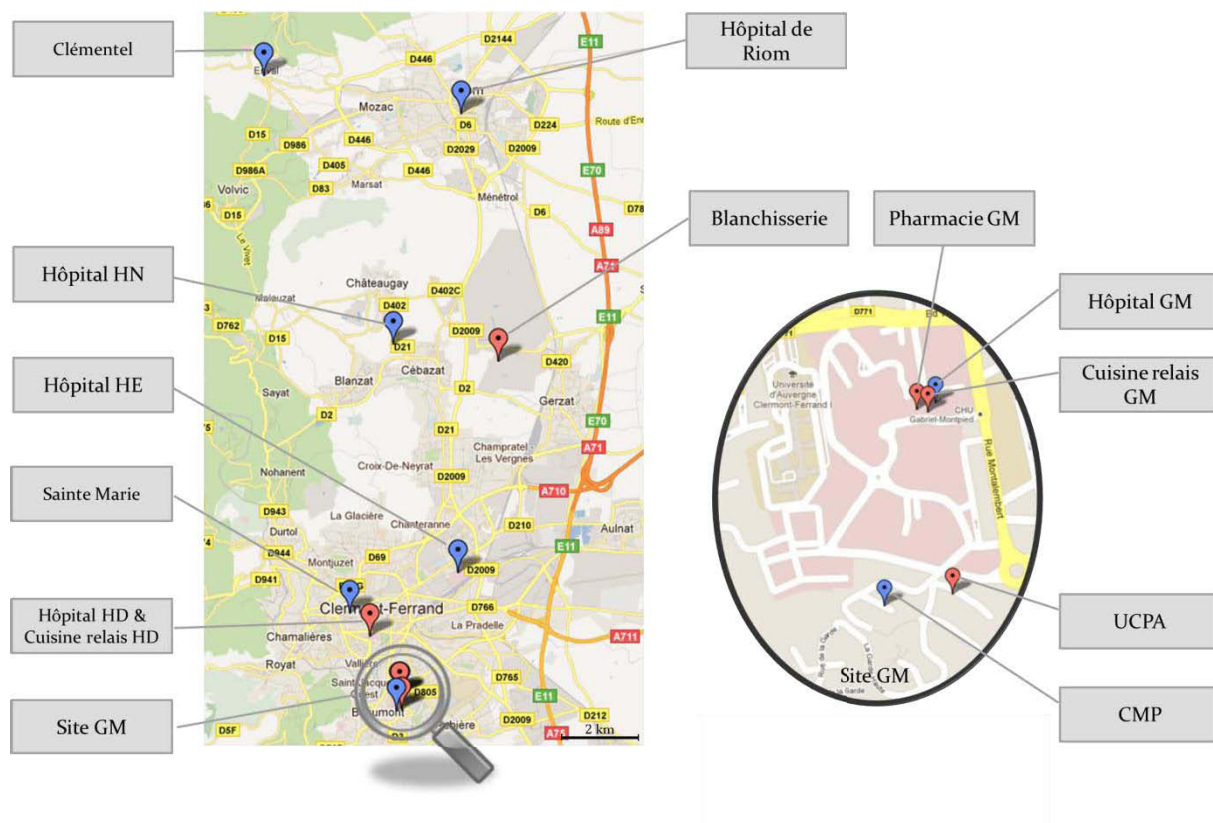


Figure 5 : Localisation géographique des sites concernés par notre étude

Le nombre de transports à réaliser, avant la réorganisation du CHU, est présenté dans le tableau suivant :

Jour	Produits	DCP	RCS	HD	CRHD	GM	CRGM	HN	CMP	UCPA	Crèche	Internat
Lundi	Repas	6	6		1/1	1/1	1/1	1/1	2/2			
	Linge	13	13	6/6		4/4		1/1	1/1	1/1		
	Médicaments	2	2	1/1				1/1				
Mardi	Repas	8	8		1/1	1/1	1/1	1/1	2/2		1/1	1/1
	Linge	13	13	6/6		4/4		1/1	1/1	1/1		
	Médicaments	2	2	1/1				1/1				
Mercredi & jeudi	Repas	6	6		1/1	1/1	1/1	1/1	2/2			
	Linge	15	15	6/6		6/6		1/1	1/1	1/1		
	Médicaments	2	2	1/1				1/1				
Vendredi	Repas	6	6		1/1	1/1	1/1	1/1	2/2			
	Linge	13	13	6/6		4/4		1/1	1/1	1/1		
	Médicaments	2	2	1/1				1/1				
Samedi & Dimanche	Repas	6	6		1/1	1/1	1/1	1/1	2/2			

Tableau 3 : Nombre de transports à réaliser par jour avant la réorganisation

Dans le Tableau 3, nous avons indiqué le nombre de transports à réaliser par jour. On note pour chaque type de produit et pour chaque site DCP/RCS. Avant la réorganisation, 5 postes de travail (1 poste 7 jours sur 7 et 4 postes 5 jours sur 7) et 3 véhicules (1 véhicule frigorifique et 2 véhicules

standards) étaient nécessaires pour la réalisation des activités de transport. Un poste de travail est défini par des horaires et une liste d'activités à réaliser. Nous avons représenté schématiquement les flux entre les sites concernés par les transports avant la réorganisation (Figure 6).

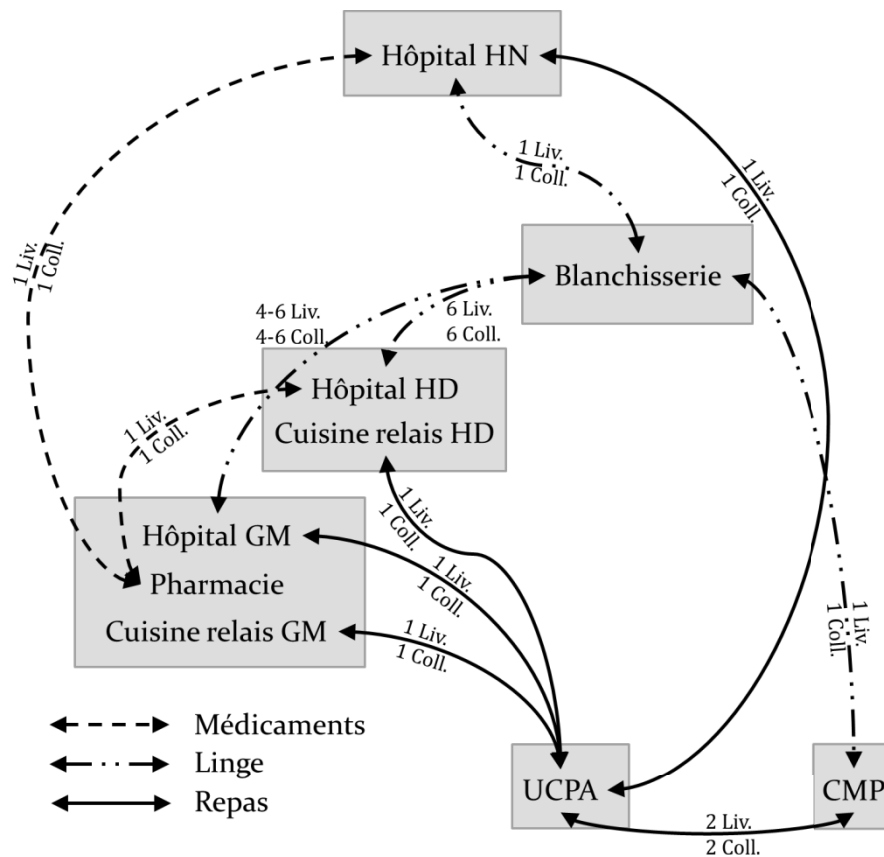


Figure 6 : Situation géographique des sites concernés par les transports avant réorganisation

Les différents chantiers au CHU ont eu des impacts importants sur la logistique existante. Nous allons décrire chacun de ces grands chantiers. Nous commencerons avec le transfert de l'Hôtel Dieu puis la centralisation des unités de production. Dans le futur, le nombre de chauffeurs et de véhicules doit permettre de traiter jusqu'à 70 activités de transports par jour.

3.2. Les différentes phases du changement

Le CHU est en pleine mutation : création d'un nouvel hôpital, réorganisation des services de soins, fermeture d'un hôpital, centralisation de la préparation des repas, prestation de services auprès d'établissements partenaires. Chacune de ces modifications aura un impact non négligeable sur le nombre de transport à réaliser.

Nous avons identifié 5 grandes phases débutant en mars 2010 et s'achevant début 2011. Chaque phase correspond à une modification du nombre d'activités que nous devons organiser. Nous allons présenter chacune de ces phases en indiquant les dates et les événements auxquelles elles correspondent. Nous renseignons pour chaque phase le nombre de transports à réaliser pour chaque type de produits.

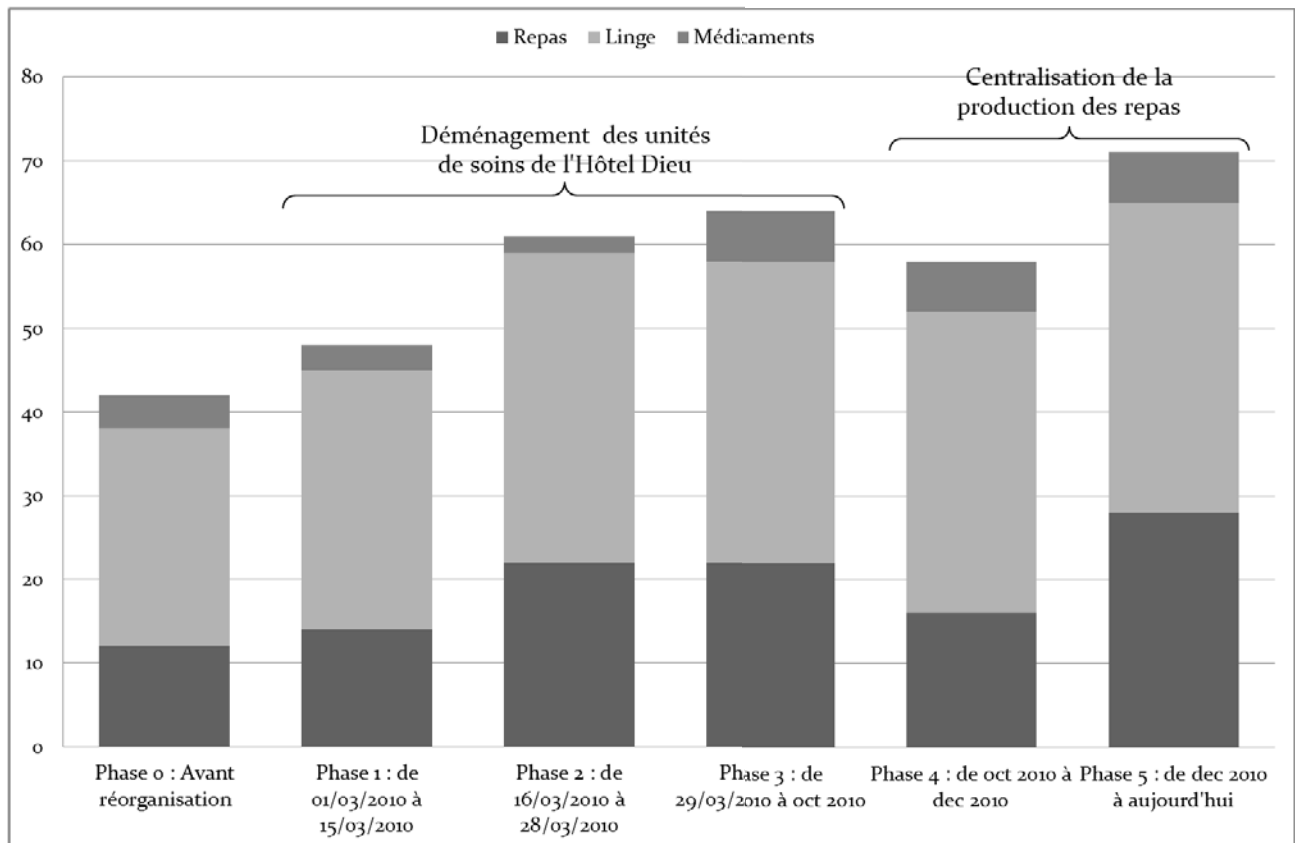


Figure 7 : Evolution du nombre d'activité en fonction des chantiers de l'hôpital

3.2.1. Le transfert de l'Hôtel Dieu

Le site de l'Hôtel Dieu, construit au XVII^{ème} siècle, fait partie du patrimoine historique de la ville de Clermont-Ferrand et l'utilisation de tels locaux ne permet plus d'accueillir ou de soigner les patients dans de bonnes conditions. Suite à ce constat, la décision de construire un nouveau bâtiment a été prise en 2001.

3.2.1.1. Présentation de l'Hôtel Dieu

L'Hôtel Dieu est un site pavillonnaire qui ne facilite pas les échanges de flux, qu'ils soient humains matériels ou informationnels. Sa position en centre-ville et sa valeur historique ne permettent pas la construction d'extensions.

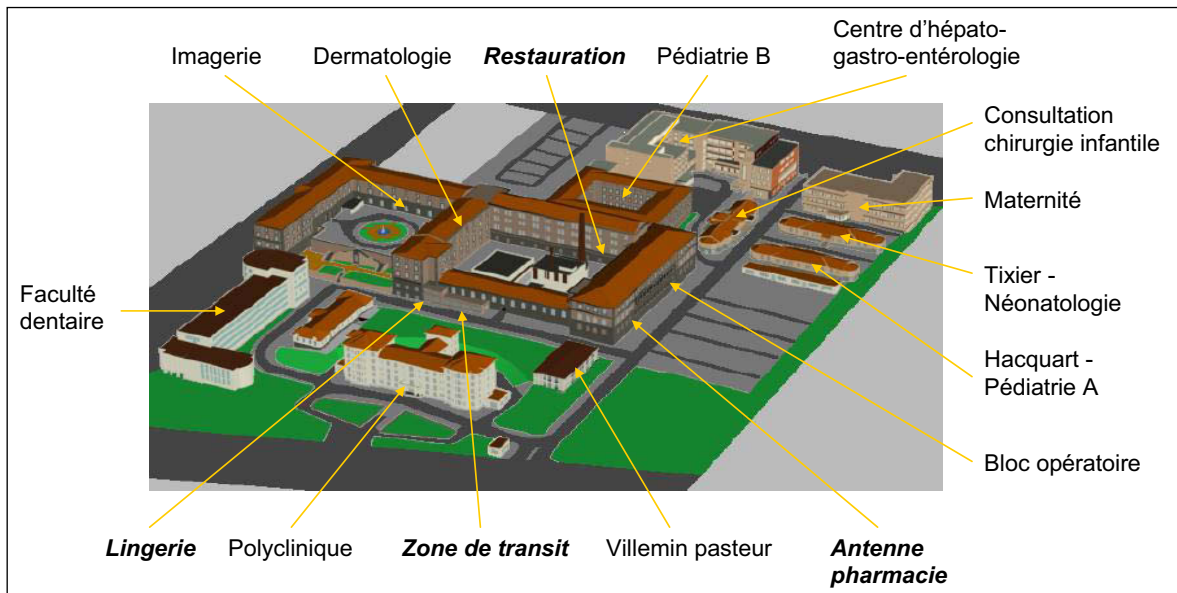


Figure 8 : Plan du site de l'Hôtel Dieu

Le site de l'Hôtel Dieu tel que présenté dans la Figure 8 est composé de plusieurs bâtiments. Les unités qui interviennent dans le cheminement des flux sont également disséminées sur le site : la lingerie, l'unité de transport interne, l'antenne pharmacie et la restauration.

L'Hôtel Dieu emploie 2 000 personnes ce qui représente une large variété de postes en partant des agents logistiques, en passant par les infirmières jusqu'aux médecins et aux directeurs. Le personnel doit répondre à une demande importante en soins : 6 000 patients par jour, 15 000 admissions en urgence par an et 26 000 personnes hospitalisées par an. Ces séjours représentent 125 000 journées d'hospitalisation par an.

Le personnel est totalement dédié à l'accueil du patient et de ses proches ainsi qu'aux soins dont il a besoin. Cela nécessite une bonne coordination entre les informations fondamentales au besoin du patient et les produits que nécessite son séjour. Le traitement des patients génère un nombre important d'échanges d'informations dont la plupart sont encore manuscrites.

3.2.1.2. Présentation de l'Hôpital d'Estaing

Le site choisi améliore l'équilibre hospitalier entre le nord et le sud de l'agglomération clermontoise. Ce nouvel hôpital porte le nom de Hôpital Estaing et est basé sur trois fondamentaux : simplicité, modularité et flexibilité, afin de créer un hôpital neuf mais surtout nouveau. Cet hôpital comprend 565 lits pour une surface de 68 000 m². Les flux de patients hospitalisés et de personnes venant pour une consultation sont différenciés dès l'origine, à partir du hall d'accueil. L'ouverture de l'HE a eu lieu début 2010.

Les locaux qui existaient à l'Hôtel Dieu comme la lingerie, la restauration et la pharmacie, n'existent plus. Par conséquent, l'ensemble des produits est acheminé sur place, prêts à être consommés immédiatement. Cela implique que toutes les préparations soient effectuées par les unités de production et que les produits soient emballés dans des conditionnements qui permettent un transport par la route.

3.2.1.3. Les différentes phases du transfert

Le déménagement des unités de soins a été fragmenté en trois phases débutant en mars 2010 et s'achevant en avril 2010. Chaque phase correspond à une modification du nombre d'activités que nous devons organiser.

Nous allons présenter chacune de ces phases en indiquant les jours de la semaine concernés, le nombre de Distribution de contenant propre (DCP) et le nombre de Retour de contenant sale (RCS) pour chaque type de produits.

Jour	Produits	DCP	RCS	HD	CRHD	GM	CRGM	HN	CMP	UCPA	HE
Lundi	Repas Linge Médicaments	6 13 2	6 16 2	6/9 1/1	1/1	1/1 4/4	1/1	1/1 1/1 1/1	1/1 1/1	1/1	1/1
Mardi à jeudi	Repas Linge Médicaments	6 14 2	6 15 2	6/7 1/1	1/1	1/1 4/4	1/1	1/1 1/1 1/1	1/1 1/1	1/1	1/1 1/1
Vendredi	Repas Linge Médicaments	6 16 2	6 15 2	6/6 1/1	1/1	1/1 4/4	1/1	1/1 1/1 1/1	1/1 1/1	1/1	1/1 3/2
Samedi & Dimanche	Repas	6	6		1/1	1/1	1/1	1/1	1/1		1/1

Tableau 4 : Phase 1 - Début du déménagement d'un hôpital (HE)

La première phase consiste à transférer 11 unités d'hospitalisation, parmi les 23 unités au total, sur 15 jours (Tableau 4). Ces unités d'hospitalisation nécessitent des repas et du linge pour les patients qu'elles hébergent.

Jour	Produits	DCP	RCS	HD	CRHD	GM	CRGM	HN	CMP	UCPA	HE	Clémentel
Lundi	Repas Linge Médicaments	11 18 1	11 19 1	6/9	2/2	1/1 5/4	1/1	1/1 1/1 1/1	2/2 1/1	1/1	4/4 3/2	1/1
Mardi à jeudi	Repas Linge Médicaments	11 19 1	11 20 1	6/7	2/2	1/1 6/6	1/1	1/1 1/1 1/1	2/2 1/1	1/1	4/4 3/3	1/1
Vendredi	Repas Linge Médicaments	11 19 1	11 18 1	6/6	2/2	1/1 6/6	1/1	1/1 1/1 1/1	2/2 1/1	1/1	4/4 3/2	1/1
Samedi & Dimanche	Repas	11	11		2/2	1/1	1/1	1/1	2/2		4/4	

Tableau 5: Phase 2 - Suite du déménagement de l'hôpital

Le Tableau 5 présente la deuxième phase du déménagement de l'hôpital. Au total 6 unités d'hospitalisation sont transférées augmentant ainsi le nombre de transports à effectuer pour les repas et le linge. Ainsi, le nombre de transports supplémentaires est de 10 activités de transports supplémentaires (5 DCP et 5 RCS) pour les repas et entre 6 et 10 activités supplémentaires pour le linge, en fonction des jours.

Jour	Produits	DCP	RCS	CRHD	GM	CRGM	HN	CMP	UCPA	HE	CIS	Clémentel	Sainte Marie	Hôpital de Riom
Lundi	Repas Linge Médicaments	12 ^h 18 ^h 2 ^h	12 ^h 18 ^h 2 ^h	1/1 ^h 2 ^h 2 ^h	1/1 ^h 6/5 ^h 2 ^h	1/1 ^h 2 ^h 2 ^h	1/1 ^h 1/1 ^h 1/1 ^h	1/1 ^h 1/1 ^h 2 ^h	2 ^h 1/1 ^h 2 ^h	6/6 ^h 5/6 ^h 1/1 ^h	1/1 ^h 2 ^h 2 ^h	1/1 ^h	1/1 ^h	2/2 ^h
Mardi à Jeudi	Repas Linge Médicaments	12 ^h 18 ^h 3 ^h	12 ^h 18 ^h 3 ^h	1/1 ^h 2 ^h 2 ^h	1/1 ^h 6/6 ^h 2 ^h	1/1 ^h 2 ^h 2 ^h	1/1 ^h 1/1 ^h 1/1 ^h	1/1 ^h 1/1 ^h 2 ^h	2 ^h 1/1 ^h 2 ^h	6/6 ^h 5/5 ^h 2/2 ^h	1/1 ^h 2 ^h 2 ^h	1/1 ^h	1/1 ^h	2/2 ^h
Vendredi	Repas Linge Médicaments	12 ^h 18 ^h 1 ^h	12 ^h 18 ^h 2 ^h	1/1 ^h 2 ^h 2 ^h	1/1 ^h 5/5 ^h 2 ^h	1/1 ^h 2 ^h 2 ^h	1/1 ^h 1/1 ^h 1/1 ^h	1/1 ^h 1/1 ^h 2 ^h	2 ^h 1/1 ^h 2 ^h	6/6 ^h 6/6 ^h 0/1 ^h	1/1 ^h 2 ^h 2 ^h	1/1 ^h	1/1 ^h	2/2 ^h
Samedi & Dimanche	Repas	12 ^h	12 ^h	1/1 ^h	1/1 ^h	1/1 ^h	1/1 ^h	1/1 ^h	2 ^h	6/6 ^h	1/1 ^h	2 ^h	2 ^h	2 ^h

Tableau 6 : Phase 3 - Fin du déménagement de l'hôpital

La troisième et dernière phase du déménagement permet de transférer les 6 dernières unités d'hospitalisation. A la fin de la phase 3, les véhicules utilisés étaient de petites tailles, le volume des véhicules nécessitaient alors 12 DCP et 12 RCS.

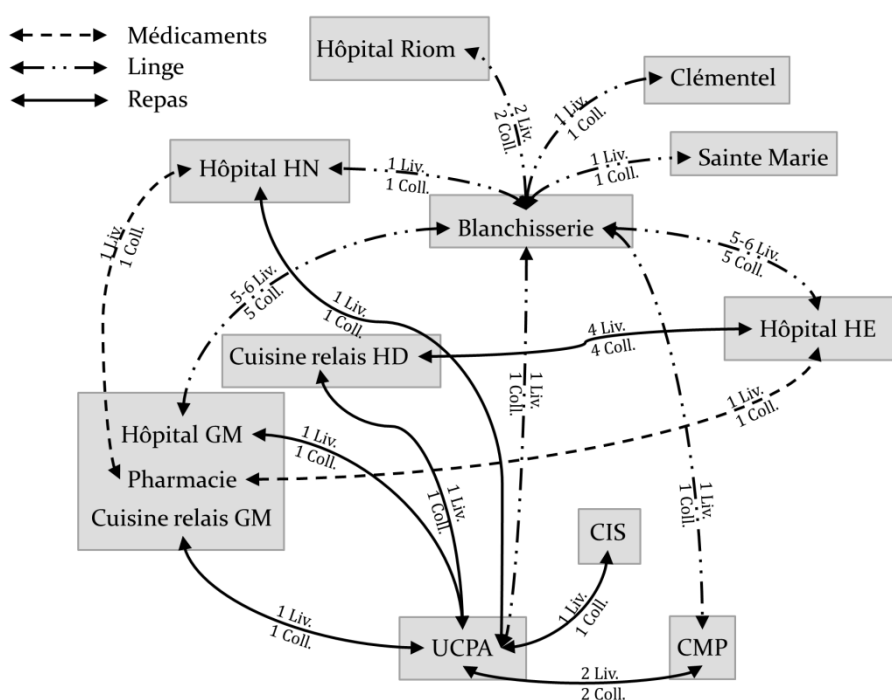


Figure 9 : état des transports entre les différents sites à la fin la phase 3

Les sites et les transports entre les sites sont indiqués sur la Figure 9. Le site « CIS » correspond à Crèche, Internat et Self qui se situent sur le site de Gabriel Montpied.

Les responsables se sont posé la question de la taille des véhicules transportant les repas, permettant ainsi d’éviter de faire deux transports : deux distributions de contenant propre et deux retours de contenant sale, ce qui permet de passer de 12 à 10 DCP et de 12 à 10 RCS. Cette économie de transport permet de livrer le CMP en deux fois : modifiant ainsi le nombre de transports de 10 à 11 DCP et de 10 à 11 RCS. L’achat de véhicules de plus grande taille était prévu pour les dernières phases.

Jours de la semaine	Produits	Livraisons	Collectes
Lundi au Dimanche	Repas	11	11

Tableau 7 : nombre de transport de repas

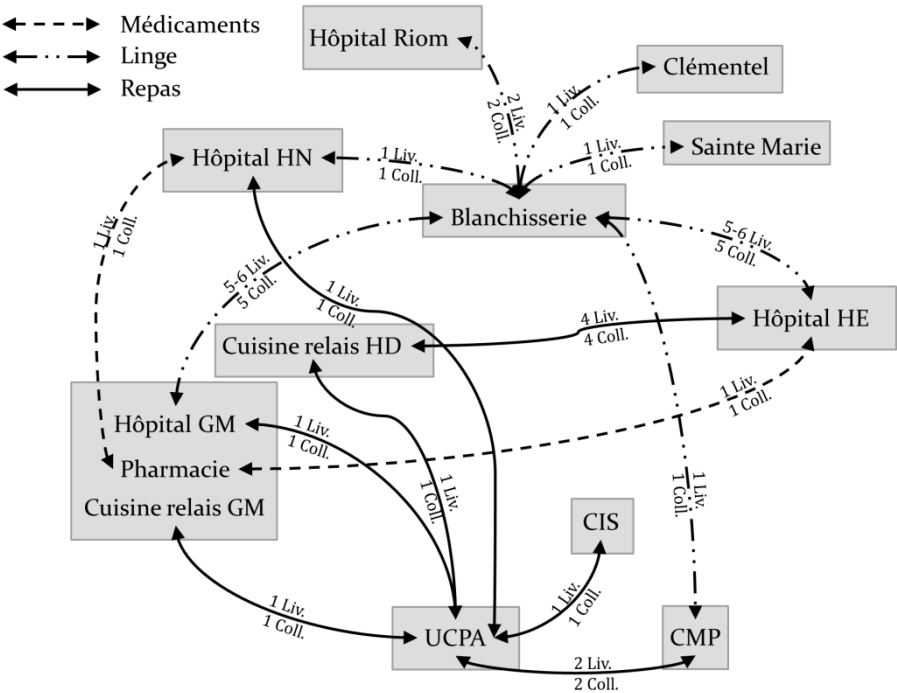


Figure 10 : Après achat des véhicules de grande taille

3.2.2. La centralisation des unités de production

La quatrième phase consiste à centraliser les activités de production en un seul point géographique. Par exemple, la production des repas est réalisée à l’UCPA et la transformation finale est assurée par les cuisines relais. La fermeture des cuisines relais implique la suppression des transports nécessaires pour livrer les produits en vrac et le report des transports au départ de la cuisine relais sur l’UCPA.

Jour	Produits	DCP	RCS	GM	CRGM	HN	CMP	UCPA	HE	CIS	Clémentel	Sainte Marie	Hôpital de Riom
Lundi	Repas Linge Médicaments	8 18 2	8 18 2	6/5	1/1	1/1 1/1 1/1	1/1 1/1	1/1	4/4 5/6 1/1	1/1	1/1	1/1	2/2
Mardi à jeudi	Repas Linge Médicaments	8 18 3	8 18 3	6/6	1/1	1/1 1/1 1/1	1/1 1/1	1/1	4/4 5/5 2/2	1/1	1/1	1/1	2/2
Vendredi	Repas Linge Médicaments	8 19 1	8 18 2	6/5	1/1	1/1 1/1 1/1	1/1 1/1	1/1	4/4 6/6 0/1	1/1	1/1	1/1	2/2
Samedi & Dimanche	Repas	8	8		1/1	1/1	1/1		4/4	1/1			

Tableau 8 : Phase 4 - Centralisation de l'unité centrale de production alimentaire (1/2)

Le Tableau 8 montre la diminution des transports liés à la centralisation des activités de la cuisine relais de l'Hôtel Dieu. Il s'agit alors de cesser d'approvisionner une cuisine relais. Ainsi le nombre de transports diminue de 4 activités de distribution de contenant propre et 4 retours de contenants sales.

Jour	Produits	DCP	RCS	GM	HN	CMP	UCPA	HE	CIS	Clémentel	Sainte Marie	Hôpital de Riom
Lundi	Repas Linge Médicaments	14 18 2	14 18 2	6/6 6/5	1/1 1/1 1/1	2/2 1/1	1/1	4/4 5/6 1/1	1/1	1/1	1/1	2/2
Mardi à Jeudi	Repas Linge Médicaments	14 18 3	14 18 3	6/6 6/6	1/1 1/1 1/1	2/2 1/1	1/1	4/4 5/5 2/2	1/1	1/1	1/1	2/2
Vendredi	Repas Linge Médicaments	14 19 1	14 18 2	6/6 6/5	1/1 1/1 1/1	2/2 1/1	1/1	4/4 6/6 0/1	1/1	1/1	1/1	2/2
Samedi & Dimanche	Repas	14	14	6/6	1/1	2/2		4/4	1/1			

Tableau 9 : Phase 5 - Centralisation de l'unité centrale de production alimentaire (2/2)

La dernière phase consiste à terminer la centralisation de la production des repas. La cuisine relais de l'hôpital GM est fermée et les livraisons de produits sur l'Hôpital GM ne se fait plus en vrac mais

en chariots repas (les repas sont conditionnés en plateau par patient). Par conséquent, le nombre de transports à effectuer passe de 4 transports par jour à 12, soit 6 DCP et 6 RCS (repas de midi et du soir).

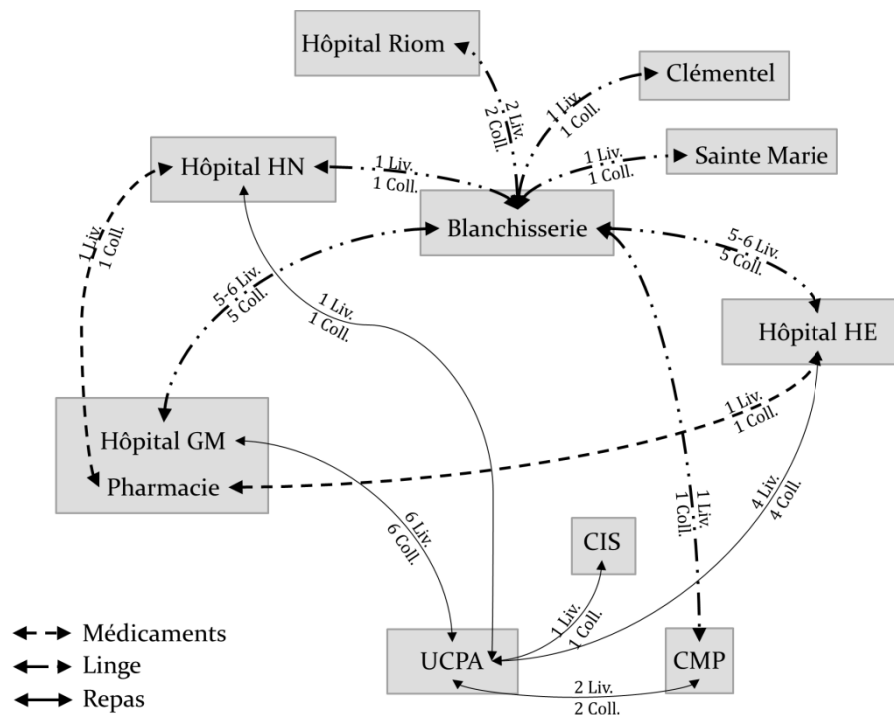


Figure 11 : État des transports à la fin des différentes réorganisations

Nous avons vu que les changements ont été mis en place progressivement dans le temps, demandant une réorganisation des transports pour chaque phase. En effet, le nombre de transports varie de 42 activités de transports avant réorganisation à 70 activités de transports après réorganisation. Ces nombreux changements entraînent de multiples modifications dans l'organisation des transports à réaliser entre les différents sites hospitaliers. La difficulté sera donc d'organiser la logistique hospitalière en vue de prévoir les ressources nécessaires pour assurer l'approvisionnement des unités de soins tout en respectant un certain nombre d'éléments tels que les heures de prises des repas des patients, les tours des patients (soins et dispensation par les infirmières).

4. Problématique

Notre travail consiste à déterminer une organisation des transports où chaque acteur pourra travailler dans des conditions satisfaisantes : respect des horaires, des quantités à livrer, des contenants à transporter, ... Tous ces transports devront être réalisés avec un nombre limité de ressources : chauffeurs, véhicules...

Dans le cadre de cette mission, les buts ont été fixés par les gestionnaires de l'hôpital. Le but principal était de construire une organisation qui permette aux unités de soins de recevoir les produits au bon moment, en bonne quantité et au bon endroit. Il s'agissait donc de :

- tester des organisations pour l'acheminement des produits, afin de pouvoir évaluer et comparer chaque hypothèse d'organisation,
- évaluer l'impact de l'absence des cuisines relais sur le site de consommation, une nouvelle gestion de flux de produits devra être construite pour répondre aux demandes des services.

Par conséquent, en concertation avec les responsables du projet de modélisation, nous avons défini les objectifs suivants :

- Suivre les flux de produits depuis les unités de production jusque dans les unités de consommation, les acteurs hospitaliers doivent pouvoir se projeter dans le futur avec une nouvelle organisation ;
- Ordonnancer et affecter la distribution de contenant propre et le retour de contenant sale, les contraintes évoluant avec le changement de structure ;
- Améliorer les délais de réapprovisionnement des unités de consommation. Avec la structure actuelle, le délai est relativement long mais ce délai devra être réduit afin de diminuer le temps de réaction des unités de production ;
- Dimensionner l'effectif de l'unité de transport externe, les produits devront être livrés depuis des sites éloignés, cela exige d'adapter les ressources humaines ainsi que les ressources matérielles tout en veillant à utiliser ces ressources de manière équilibrée.

Comme nous l'avons vu précédemment, le transport externe concerne l'organisation des transports entre les unités de production et les unités de consommation. Nous allons prendre en compte de nombreuses ressources et contraintes dans notre étude en lien avec les demandes des responsables des différentes unités concernées.

Nous avons identifié 3 problèmes distincts mais complémentaires pour répondre aux interrogations des responsables hospitaliers : le problème de transport d'un seul type de produit, puis le problème de transport de tous les types de produits et enfin le problème de dimensionnement et de constitution des plannings journaliers pour les chauffeurs. Nous allons présenter pour chaque problème, les objectifs fixés, les données que nous avons en entrée, les contraintes que nous devons respecter et les types de résultats que nous souhaitons fournir.

4.1. Transport d'un seul type de produit

Le principal objectif de notre étude concernant le traitement d'un seul type d'activité, à savoir soit la distribution de contenant propre, soit les retours de contenants sales pour un seul type produit (les repas, par exemple), est de répondre aux interrogations des responsables des unités de soins sur les horaires d'arrivée des repas et de retour des contenants, aux interrogations des responsables des unités de production sur les horaires de passage des véhicules et aux interrogations des responsables de l'unité de transport externe sur le nombre de chauffeurs et de véhicules nécessaires pour les transports.

Dans un premier temps, un seul type d'activité de transport est considéré car une des premières organisations envisagées étaient de réaliser alternativement des distributions de contenants propres et des retours de contenants sales afin d'assurer un nettoyage des véhicules après le transport de contenants sales. Le problème consiste à ordonnancer les activités de transport (c'est-à-dire déterminer les dates de début) en respectant les dates de début au plus tôt et les quantités de ressources disponibles chauffeurs, véhicules, quais de chargement/déchargement) de manière à minimiser le retard.

L'objectif est de fournir aux responsables les dates de chargement/déchargement des contenants, pour un nombre de chauffeurs et de véhicules donnés afin de vérifier leur adéquation avec les horaires prévus des lignes de production et des heures de nettoyage. Nous avons rencontré de nombreux acteurs (unités de soins, agents des transports externes, des transports internes, l'UCPA) afin de valider les données utiles à notre problème :

- le nombre d'activités de transport à réaliser,

- les heures de début au plus tôt des activités (liées à la capacité de production des unités de production),
- les heures de fin au plus tard des activités (liées à l'heure de prise des repas par les patients),
- le nombre de quais de chargement et de déchargement au site de production,
- les durées de chargement et de déchargement aux unités de production comme aux unités de consommation,
- les durées de transport entre les sites,
- les durées de chargement et de déchargement sur les sites.

4.2. Transport de plusieurs types de produit

Nous nous sommes ensuite intéressés à l'organisation du transport de plusieurs types de produits pour un nombre de chauffeurs donné. Nous avons alors intégré un ensemble de contraintes supplémentaires :

- Les chauffeurs travaillent selon un planning imposé de 8h intégrant une pause de 30 minutes ;
- Les activités sont soumises à des contraintes de précédence : un retour de contenant sale ne peut avoir lieu que lorsque la distribution des contenants propres est terminée ;
- Les quais de chargement/déchargement sur les sites de consommation sont en nombre limité et partagé par tous les types de produits ;
- Les aires de nettoyage et les lignes de production sont en nombre limité et sont soumises à un planning d'ouverture ;
- Les véhicules sont de différents types et il existe des incompatibilités entre les produits et les types de véhicules.

L'objectif est alors, sous ces contraintes, de répartir les activités de transports entre les chauffeurs et d'ordonnancer les activités de chaque chauffeur tout en minimisant le retard des activités et les heures supplémentaires des chauffeurs.

Les données recensées pour le problème de transport d'un seul type de produits sont enrichies avec les données suivantes :

- le nombre de chauffeurs disponibles et leur planning,
- le nombre de ligne de production et d'aire de nettoyage pour chaque site de production et leur planning,
- le nombre de quais de chargement et de déchargement pour chaque site de consommation,
- le nombre de type de véhicules et le nombre de véhicules de chaque type,
- les incompatibilités entre produits et types de véhicules.

4.3. Dimensionnement et constitution des plannings journaliers pour les chauffeurs

Le fait d'imposer des plannings journaliers aux chauffeurs peut avoir un impact sur la possibilité ou non de fournir une solution réalisable, c'est-à-dire une solution pour laquelle toutes les activités sont réalisées. Par conséquent, les responsables des transports externes ont accepté de laisser une certaine liberté dans la construction des horaires des plannings de chaque chauffeur. De plus, les responsables ont demandé à pouvoir vérifier que l'ordonnancement des activités de transports respecte toujours les contraintes des heures de mise à disposition des contenants, des heures de fin au plus tard des activités de transport...

Nous avons pris en compte en plus des contraintes que nous avons décrites précédemment celles relatives à la construction de planning (durée maximale de travail et respect de la pause de 30 minutes...). Le problème consiste à déterminer, pour un ensemble d'activités données, le nombre minimal de chauffeurs nécessaires ainsi que le planning journalier et la liste ordonnée des activités à réaliser pour chaque chauffeur.

5. Conclusion

Les chantiers structurels et organisationnels souhaités par les dirigeants modifient énormément les fonctionnements actuels du centre hospitalier de Clermont-Ferrand. Nous avons décrit la construction et le transfert d'activités de soins du site de l'Hôtel Dieu vers l'Hôpital Estaing et la centralisation des activités des unités de production qui augmentent le nombre de transports à organiser d'une quarantaine à 70 par jour.

Comme nous l'avons vu, ces changements entraînent un changement organisationnel sur la gestion des flux de produits et sur la logistique telle qu'elle existait. De plus, les unités de soins, inquiètes de l'éloignement des unités de production exigent un niveau de service aussi élevé voire plus élevé qu'avant ces transformations impliquant ainsi des contraintes sur les dates de livraisons à respecter et le nombre de transports à effectuer dans une journée.

Notre objectif consiste à proposer aux responsables du CHU un outil d'aide à la décision qui leur propose différentes solutions correspondant à des organisations de transports réalisables, c'est-à-dire pour lesquelles les retards des activités et les heures supplémentaires des chauffeurs sont minimisées des chauffeurs.

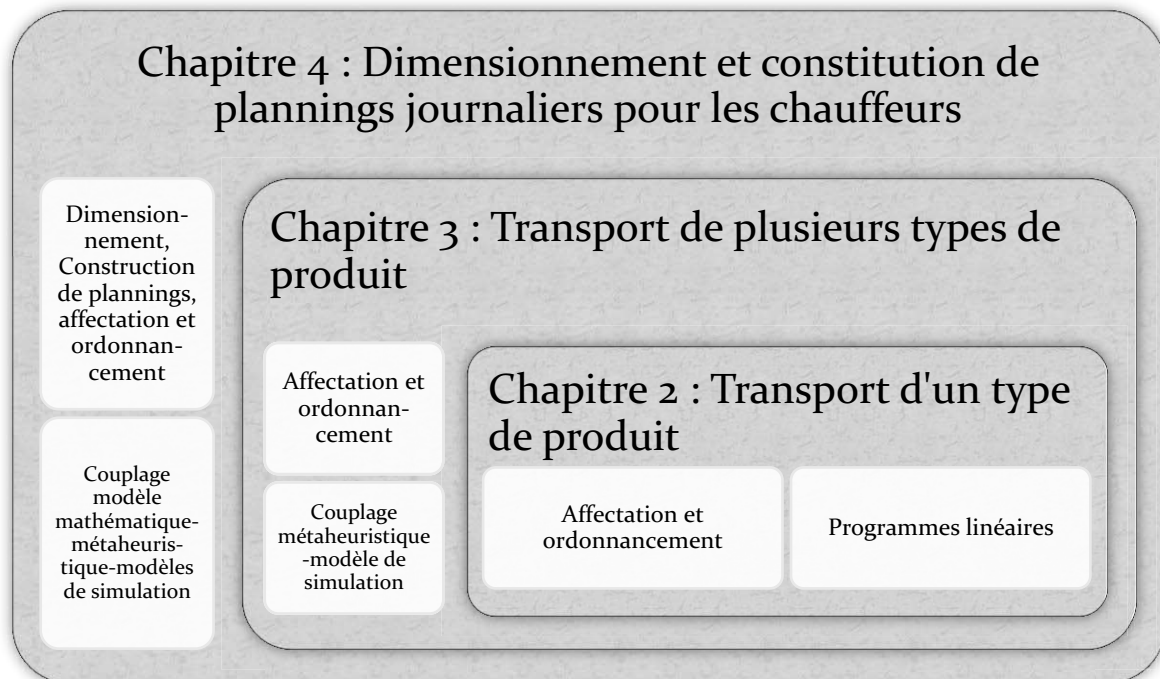


Figure 12 : Démarche suivie

La Figure 12 présente la démarche suivie dans le mémoire pour parvenir à la construction d'un outil d'aide à la décision permettant de répondre aux questions suivantes, pour un nombre d'activités de transport donné :

- Combien de chauffeurs sont nécessaires ?
- Quel chauffeur réalise quelle activité de transport avec quel véhicule ?
- Dans quel ordre chaque chauffeur enchaîne les différentes activités qui lui sont affectées ?
- Quels sont les horaires de travail de chacun des chauffeurs ?
- Y a-t-il des activités qui ne sont pas réalisées ?
- Y a-t-il des retards à prévoir ?
- Les chauffeurs ont-ils des heures supplémentaires ?
- Quel est le taux d'occupation de chaque chauffeur ?
- Quelle est la durée de l'attente de chaque ressource ?

Nous procéderons par étape : nous nous focalisons dans un premier temps sur le nombre de ressources nécessaires pour effectuer les transports d'un seul type de produit. Puis, nous nous intéressons au problème de transport en prenant en compte tous les types de produits simultanément avec un nombre de chauffeurs donné et des plannings journaliers de travail fixé. Pour finir, nous déterminons le nombre de chauffeurs, ces horaires de travail, l'affectation et l'ordre dans lequel chaque chauffeur doit effectuer les activités qui lui sont affectées.

Chapitre 2 Transport d'un seul type de produit

1. Introduction

Nous avons vu qu'il y a de nombreuses organisations des transports à construire pour répondre au besoin de l'hôpital. La première étude qui nous a été demandée était de construire une organisation qui permette de réaliser les transports de repas entre l'UCPA et les sites de l'Hôpital GM et de l'hôpital HE. Cette configuration correspond à la fin de la phase 5 de centralisation de l'unité de production des repas. Le transport de repas nécessite des véhicules (tous de même type, ici) et des chauffeurs. La particularité de notre problème est que le chauffeur ne participe ni au chargement ni au déchargement des véhicules sur le site de l'UCPA et peut ainsi changer plusieurs fois de véhicules. L'objectif est de répondre aux questions suivantes : comment organiser les transports de repas de manière à les livrer à la date souhaitée, quelles est l'heure de livraison des repas sur chaque site combien de véhicules et de chauffeurs, au minimum, sont nécessaires. Le transport des repas nécessite des contenants qui doivent être collectés auprès des différents sites avant de procéder à la livraison. Par conséquent, le problème se décompose en deux parties : l'organisation des collectes et l'organisation des livraisons. La troisième partie de ce chapitre consiste à organiser les deux types d'activités de transport toujours dans le cas d'un seul type de produit.

Le problème de transports d'un type de produit concerne l'organisation des activités de transport de contenants propres préparés par un seul site de production et des activités de transport de contenants sales issus des différents sites de consommation. Dans la suite de ce document, ces activités seront nommées activités de distribution de contenant propre (DCP) et activités de retour de contenant sale (RCS). L'organisation de cette étude est liée au fait que les chauffeurs sont dédiés à un type de véhicule : un chauffeur conduit toute la journée un véhicule frigorifique, s'occupant ainsi des transports de repas, alors que d'autres gèrent le transport par véhicule standard (linge et médicaments).

Dans ce chapitre, nous commençons par présenter le modèle de connaissance de ce problème de transport. Nous poursuivons par la présentation de travaux de la littérature dans le domaine hospitalier s'y rapportant. Dans notre démarche, nous nous restreignons dans un premier temps à un seul type d'activité de transport (DCP ou RCS) avant de considérer le problème en prenant en compte les deux types d'activité de transport (DCP ou RCS). Pour chaque problème présenté, nous donnons un modèle mathématique basé sur le Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPS) et présentons notre expérimentation.

2. Modèle de connaissance

Bien que l'étude initiale porte sur le transport des repas, notre modèle de connaissance considère n'importe quel type de produit (repas, linge ou médicament). Une activité de distribution de contenant propre (ou de retour de contenant sale) traite simultanément plusieurs contenants identiques (par exemple transport de plusieurs armoires de linge dans un même véhicule). Par abus de langage,

nous utiliserons le terme de contenant pour désigner un lot de contenants pouvant être chargé dans un véhicule. Nous supposons que les contenants sont disponibles en nombre suffisant.

Le système est composé de plusieurs sites à visiter. Nous différencions ici, le site de production des sites de consommation. Le site de production comporte un (ou plusieurs) quai(s) qui permet(tent) d'assurer le chargement ou le déchargement d'un contenant dans un véhicule selon une durée. Un quai est caractérisé par un type (quai de chargement ou quai de déchargement). Nous supposons que les quais de chargement et de déchargement sur les sites de consommation sont en nombre suffisant.

Une route relie deux sites. Le temps de parcours entre deux sites est évalué selon une durée de parcours à l'aller et une durée de parcours au retour qui peut être différente. En effet, de nombreux sens uniques ne permettent pas de prendre les mêmes trajets à l'aller ou au retour.

Les ressources matérielles mobiles se déplaçant entre les sites sont :

- Les véhicules : un véhicule est identifié selon un numéro de matricule. Il assure les activités de transport (transport de contenant et transport à vide). Tous les véhicules disponibles pour le transport d'un type de produits sont du même type ;
- Les chauffeurs : un chauffeur est identifié selon un numéro. Un chauffeur peut conduire n'importe quel véhicule et peut changer plusieurs fois de véhicule de même type lors d'une journée de travail. Il se déplace avec un véhicule entre les différents sites.

Les chauffeurs ne participent pas au chargement des véhicules lors des transports de contenants propres ou lors du déchargement lors des activités de transport de contenants sales. Au sein de l'UCPA, le déplacement des véhicules est assuré par le personnel de l'UCPA. Les chauffeurs sont supposés être disponibles à toute heure de la journée, c'est-à-dire qu'ils ne travaillent pas selon des horaires de travail.

Une activité de transport est caractérisée par un site-origine et un site-destination. Dans le cas d'une distribution de contenant propre, le site-origine est le site de production et le site-destination un site de consommation. Dans le cas du retour de contenant sale, le site-origine est un site de consommation et le site-destination le site de production.

Une activité de distribution de contenant propre se décompose en 3 phases de la manière suivante (Figure 13) :

- Phase 1 : le chargement qui nécessite un quai de chargement et un véhicule et a une durée connue. Le chargement a une date de début au plus tôt imposée par le site de production qui correspond à la date de fin de production du premier contenant. Le site de production a des capacités de production telles que la mise à disposition des contenants ne peut se faire qu'à une fréquence donnée. Par exemple, pour les repas, 2 contenants sont préparés toutes les 30 minutes ;
- Phase 2 : le transport qui nécessite un véhicule et un chauffeur et qui a une durée qui dépend de l'origine et de la destination de l'activité ;
- Phase 3 : le déchargement qui nécessite un véhicule et un chauffeur (le chauffeur participe au déchargement), et qui a une durée connue. Le déchargement a une date de fin au plus tard souhaitée par le site de consommation. Si le déchargement finit après la date de fin souhaitée, alors l'activité est en retard.

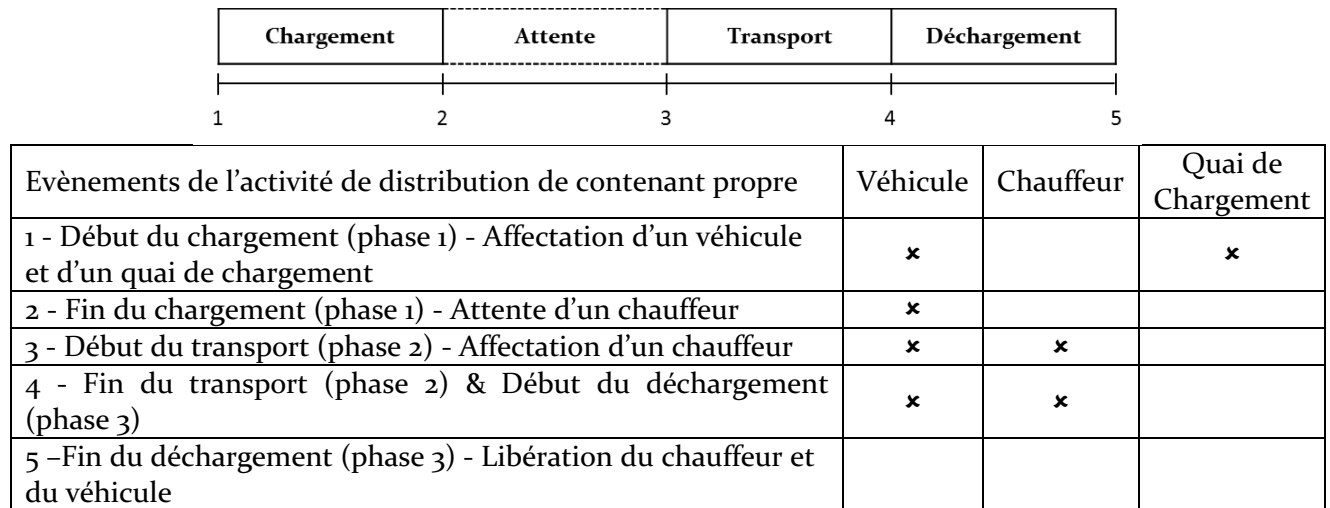


Figure 13 : Description d'une activité de distribution de contenant propre

Une activité de retour de contenant sale se décompose en 3 phases de la manière suivante (Figure 14) :

- Phase 1 : le chargement qui nécessite un véhicule, un chauffeur et qui a une durée connue. Le chargement a une date de début au plus tôt imposée par le site de consommation ;
- Phase 2 : le transport qui nécessite un véhicule et un chauffeur, et qui a une durée qui dépend de l'origine et de la destination de l'activité ;
- Phase 3 : le déchargement qui nécessite un véhicule et un quai de déchargement, et qui a une durée connue. Le déchargement a une date de fin au plus tard souhaitée par le site de production. Si le déchargement finit après la date de fin souhaitée, alors l'activité est en retard.

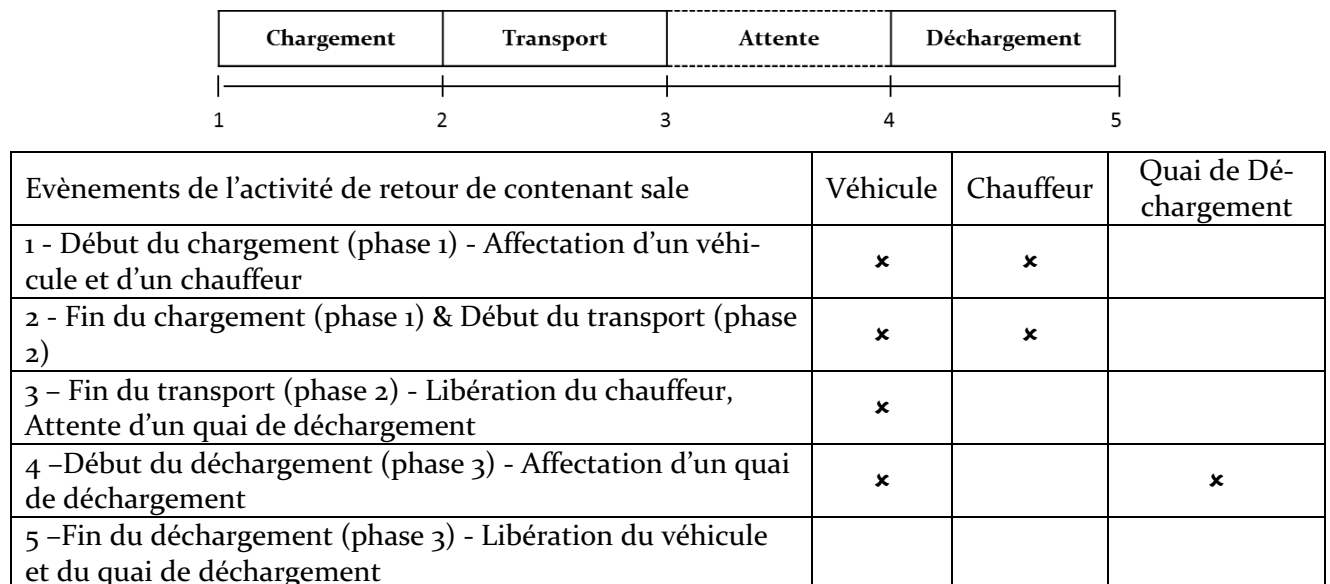


Figure 14 : Description d'une activité de retour de contenant sale

Les véhicules et les chauffeurs sont au site de production en début et en fin de journée. Un transport à vide est nécessaire dans le cas où un véhicule et un chauffeur réalisent deux activités de transport successives avec le site-destination de la première activité différent du site-origine de la seconde. La durée dépend de l'origine et de la destination des activités. Un transport à vide nécessite un chauffeur et un véhicule.

L'objectif de notre problème est de déterminer la date de début des phases de chaque activité et les ressources affectées tout en minimisant la somme des retards.

Les contraintes à prendre en compte sont :

- le respect des dates de début au plus tôt des chargements,
- le respect des dates de fin souhaitées des déchargements,
- la disponibilité des ressources : une activité ne peut commencer que lorsque les ressources nécessaires sont disponibles,
- le respect du nombre de ressources disponibles (véhicules, chauffeurs, quais de chargement ou quais de déchargement).

Notre problème implique la gestion des ressources en plus de l'organisation des transports. Nous devons être vigilants à la prise en compte de certaines caractéristiques pour la modélisation de notre problème :

- (1) la diversité des ressources utilisées (quais, véhicules et chauffeurs),
- (2) le nombre variable de ressources nécessaires pour réaliser les différentes phases de transport (le chauffeur ne participe ni au chargement, ni au déchargement au site de production),
- (3) la gestion de l'attente de certaines ressources entre deux étapes (attente d'un chauffeur pour réaliser un transport ou d'un quai pour le déchargement).

3. Etat de l'art

Dans le Chapitre 1, nous avons mentionné différents travaux réalisés dans le domaine hospitalier. Nous avons sélectionné les articles qui focalisent leur étude sur le transport d'un seul type de produit (linge, dossiers patient, ...). Nous nous sommes intéressés à la modélisation proposée pour les problèmes présentés, ainsi qu'à la méthode de résolution utilisée.

Nous présentons différentes études réalisées dans un environnement hospitalier. Le Tableau 10 récapitule les caractéristiques des articles présentés.

Références	Flux concerné	Problème théorique	Type de demande	Méthodes de résolution
(Shang & Cuff, 1996)	Transport de dossiers patients	PDP	Statique	Heuristique
(Sheng, Wang, Huang, & Yen, 2006)	Transport de matériel médical	VRP	Statique	Algorithme génétique
(de Magalhães & de Sousa, 2006)	Transport de produits pharmaceutique	VRP	Dynamique	Heuristique
(Shih & Chang, 2001)	Collecte de déchets	PVRP	Dynamique	Heuristique
(Florez, Aguirre, Amaya, & Velasco, 2008)	Collecte de linge sale	SDCVRP	Statique	Programme linéaire
(Beaudry, Laporte, Melo, & Nickel, 2006)	Transport de patients	DARP	Dynamique	Heuristique

Tableau 10 : Caractéristiques des différentes études

(Shang & Cuff, 1996) ont orienté leurs travaux sur l'étude d'un flux en particulier : le transport des dossiers de patients dans une ville américaine. Cette activité est demandée par un médecin qui a besoin de nombreuses informations pour évaluer les besoins d'un patient. Les dossiers des patients ne sont pas forcément dans le bureau du médecin, ce qui nécessite un système de collecte des éléments des dossiers et de livraison du dossier afin de mettre le dossier du patient à disposition du

médecin avant son arrivée (Figure 15). Les centres où se situent les éléments sont souvent les mêmes, par conséquent, les véhicules doivent souvent passer par les mêmes centres.

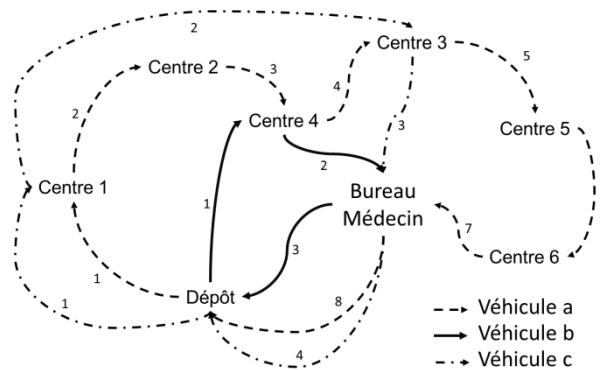


Figure 15 : Exemple de tournées de véhicules pour le transport de dossier patient

Les véhicules commencent et terminent leur tournée au dépôt. Chaque activité décrivant le transport d'un dossier patient, est définie avec plusieurs origines (les centres de soins qui ont examiné le patient et qui ont un élément de dossier en leur possession) et une destination (le bureau du médecin). Pour chaque élément d'un dossier, une date de mise à disposition et une date de livraison souhaitée sont renseignées. Les éléments d'un dossier peuvent être transférés à un autre véhicule pour la livraison au médecin (dans notre exemple, un transfert du véhicule *a* au véhicule *b* est effectué au centre 4). L'ensemble des activités est connu à l'avance. Pour ce travail, les auteurs ont modélisé leur problème comme un Pickup and Delivery Problem (PDP). L'objectif est de construire et d'affecter des tournées à chaque véhicule en organisant les livraisons et les transferts des éléments d'un dossier d'un véhicule à un autre tout en respectant différentes contraintes :

- Un véhicule ne peut livrer un dossier que s'il a collecté tous les éléments constitutifs du dossier au préalable ou s'il a obtenu ces éléments par un autre véhicule ;
- Un transfert ne peut être effectué que si le véhicule porteur du dossier est arrivé avant ou en même temps que le véhicule qui assurera la livraison ;
- Les éléments de dossier ne peuvent être récupérés avant la date de mise à disposition et doivent être livrés avant la date de livraison souhaitée.

Le nombre de véhicules n'est pas fixé. L'objectif de l'étude est de minimiser le nombre de véhicules utilisés (pondéré par le coût d'utilisation d'un véhicule), le nombre de clients insatisfaits (activités en retard et activités non réalisées) et la distance totale parcourue par les véhicules. Les auteurs ont décomposé un jour par tranche de 15 minutes. Pour résoudre ce problème, les auteurs proposent une heuristique composée de 4 étapes :

- saisie des demandes à satisfaire et évaluation du nombre de véhicules nécessaires pour réaliser l'ensemble des transports,
- regroupement des éléments selon leurs dates de livraison souhaitées (du plus tôt à la plus tardive), sélection du prochain élément disponible à partir de sa date de disponibilité,
- insertion de cet élément dans les tournées existantes (tournées partielles pour un véhicule). si l'élément inséré dans une tournée n'entraîne pas de trajet supplémentaire, alors on insère cet élément, sinon l'élément est inséré dans une autre tournée,
- construction des tournées pour chaque véhicule. si la nouvelle tournée ne peut être effectuée par le véhicule sans entraîner de retard, alors on sélectionne un autre véhicule, sinon la tournée sera affectée à un autre véhicule (supplémentaire).

Les auteurs ont comparé les résultats obtenus par leur méthode avec l'outil utilisé à l'hôpital avec les critères suivants : la moyenne des retards, la moyenne des durées de trajet et la moyenne du nombre de véhicules utilisés. L'hôpital livre quotidiennement 300 dossiers, dont 167 sont urgents et doivent être livrés sans retard alors que les autres peuvent être livrés en retard. Ils obtiennent une amélioration de 37% en moyenne du coût des tournées sur l'ensemble des tests.

Un autre flux a été étudié par (Sheng, Wang, Huang, & Yen, 2006) : le matériel médical. Le problème consiste à distribuer du matériel médical à partir d'un stock jusqu'aux unités de soins. Les véhicules sont mis en attente au centre de transmission qui correspond au dépôt des véhicules. Les auteurs ont modélisé leur problème comme un Vehicle Routing Problem avec un dépôt unique, une flotte homogène de véhicules et des activités de transport (ou de transmission) qui sont connues à l'avance (Figure 16).

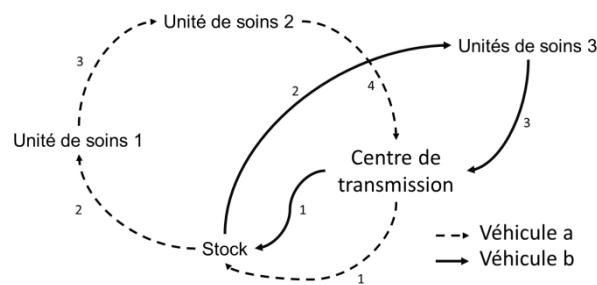


Figure 16 : Exemple de tournées de véhicules pour le transport du matériel médical

L'objectif de leur travail est de minimiser le temps de transmission du matériel entre le stock et les unités de soins et de maximiser l'utilisation des véhicules. Les hypothèses de leur étude sont :

- l'origine de chaque transmission est fixée au local de stock du matériel,
- les destinations et les tailles de charge à transporter sont connues à l'avance,
- la matrice des distances est asymétrique,
- le nombre de véhicules est donné,
- les durées de transmission du matériel médical et de parcours des véhicules sont connues,
- la capacité de chaque véhicule doit être respectée,
- les véhicules commencent et finissent leurs tournées au centre de transmission.

Pour résoudre leur problème, les auteurs proposent l'utilisation d'un algorithme génétique mais ne donnent pas de détail sur le codage de la solution et sur les opérateurs utilisés.

(de Magalhães & de Sousa, 2006) se sont intéressés à la distribution des produits pharmaceutiques aux pharmacies d'une grande ville. Les activités de transport concernent la livraison de produits pharmaceutiques depuis un stock global (ou dépôt).

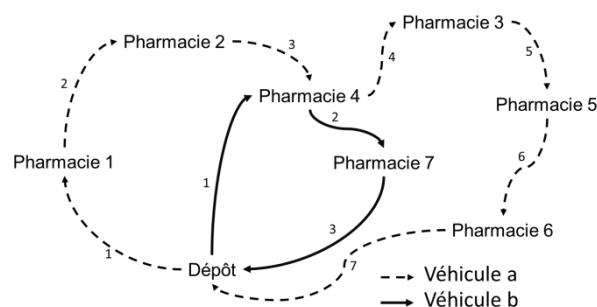


Figure 17 : Exemple de tournées de véhicules dans le cas de livraison de médicaments

Les auteurs ont modélisé leur problème comme un VRP dynamique avec un dépôt unique et une flotte de véhicules hétérogène. Dans leur étude, les auteurs prennent en compte en plus des activités de distribution des activités préalables au transport : la phase de commande des médicaments et la phase de préparation de cette commande. La phase de préparation à prendre en compte influence la date de mise à disposition des médicaments. Les activités de transport ne peuvent débuter avant cette date. Ainsi chaque commande est envoyée, traitée puis préparée avant d'être livrée. Par contre, les commandes peuvent être envoyées par les pharmacies de ville à tout moment de la journée, la demande de transport devenant dynamique. Un véhicule peut pendre autant de commandes que peut l'autoriser sa capacité. L'objectif de leur étude est de réaliser l'ensemble des transports tout en minimisant les délais de distribution et les coûts de distribution dépendant des trajets. Les auteurs proposent une approche heuristique en 4 étapes :

- construction d'une liste de destinations à visiter en fonction de leur date de disponibilité, puis, regroupement des destinations en fonction de la charge totale et de leur répartition géographique,
- à partir de ces regroupements, construction de tournées par insertion en minimisant le coût de distribution pour chaque véhicule,
- sélection d'une (des) tournée(s) où les dates de livraison souhaitées ne sont pas respectées,
- amélioration de la (des) tournée(s) sélectionnée(s) avec des mouvements de type « 2-opt ».

Les auteurs ont comparé les résultats obtenus avec l'approche proposée et la procédure manuelle utilisée pour organiser les transports. Leur approche permet d'améliorer l'ensemble des tournées sur le critère de la distance totale parcourue. Toutefois, les auteurs constatent, sans l'expliquer, que dans le cas où la durée de distribution entre le stock et les pharmacies dépassent une heure, il n'y a pas ou peu d'amélioration.

L'étude de (Shih & Chang, 2001) concerne la collecte des déchets de différents hôpitaux et cliniques de Taïwan dans le but de les traiter (Figure 18).

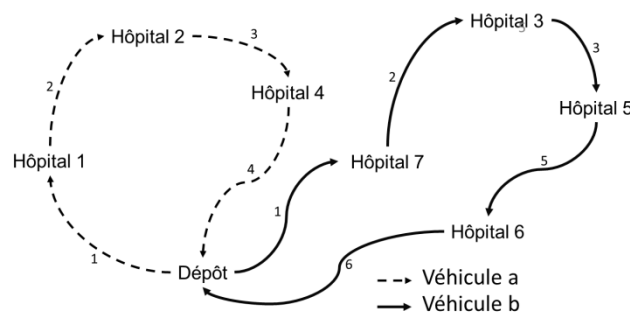


Figure 18 : Exemple de tournées de véhicules pour la collecte de déchets

Les différents sites hospitaliers doivent être visités une fois par semaine et chaque lieu de collecte spécifie le(s) jour(s) souhaité(s) pour la collecte des déchets. Pour les lieux qui définissent plusieurs jours souhaités, il s'agira d'en choisir un parmi ceux-là. Chaque activité est définie selon un lieu de collecte et une quantité à collecter. Pour collecter les déchets, une flotte de véhicules hétérogène est disponible. Le problème consiste donc à déterminer le jour de collecte et à construire les tournées pour chaque jour. Les auteurs ont modélisé leur problème comme un Periodic Vehicle Routing Problem. L'objectif de cette étude est de minimiser la distance parcourue par semaine. Les auteurs proposent une approche en 2 phases :

- la première phase consiste à résoudre un problème classique de tournées de véhicules afin de déterminer un ensemble de tournées pour l'ensemble des véhicules,

- la seconde phase utilise une méthode de programmation linéaire pour affecter les tournées à un jour particulier de la semaine de manière à équilibrer les journées de travail.

La construction de leur outil d'aide à la décision est décomposée en 5 étapes :

- Le recueil de données et la préparation des données : cette étape permet d'identifier les différentes caractéristiques des collectes à réaliser et le nombre de véhicules disponibles ;
- La séquence des lieux à collecter est construite avec le concept de « space filling curve » (SFC) qui privilégie la proximité des lieux (phase 1) ;
- Les séquences sont modifiées avec des mouvements de type « 2-opt », tout en intégrant les activités dynamiques (phase 1) ;
- Les séquences sont ensuite affectées à un jour de la semaine à l'aide d'un modèle mathématique (phase 2) ;
- Une représentation graphique de la solution est donnée.

(Florez, Aguirre, Amaya, & Velasco, 2008) ont aussi réalisé des études sur la collecte du linge sale et la distribution du linge propre dans un hôpital. La collecte du linge sale et la distribution de linge propre se font à l'aide de véhicules. Les personnes en charge de la collecte dépendent du service de la blanchisserie et effectuent la collecte en passant dans les unités de soins. Ces personnes savent à quelle heure le linge sale sera disponible pour la collecte. Une fois le linge sale collecté, il est ensuite traité par la blanchisserie puis redistribué. La quantité distribuée dépend de la quantité de linge collectée.

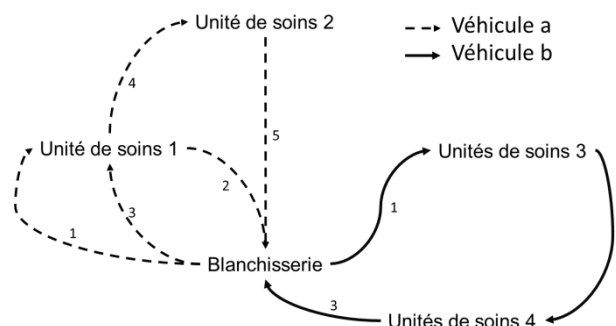


Figure 19 : Exemple d'une tournée de collecte de linge sale un jour donné

Le problème est divisé en deux sous parties : la collecte du linge sale dans les unités de soins et la livraison du linge propre. La résolution de la première partie influe directement sur la résolution de la seconde partie. Le but de leur étude est de déterminer la fréquence de collecte du linge sale, de construire les tournées de collecte et de distribution du linge et de déterminer les horaires des tournées de collecte du linge sale. Les auteurs ont modélisé leur problème avec un Split Delivery Capacitated Vehicle Routing Problem (SDCVRP) pour les raisons suivantes :

- La quantité de linge à collecter dépasse la capacité d'un véhicule ;
- La quantité totale de linge à collecter n'est pas disponible au même moment ;
- Une unité de soins peut être visitée par un ou plusieurs véhicule (s).

Les hypothèses prises en compte pour la résolution de ce problème sont les suivantes :

- Il ne peut y avoir plus de 6 tournées de collecte par jour ;
- La matrice de distances entre deux points est symétrique ;
- La flotte de véhicule est homogène.

Dans leur article, les auteurs ne traitent que de la collecte du linge sale. L'objectif de leur étude est de minimiser la distance totale parcourue tout en respectant les contraintes de capacité de véhicule et les contraintes de date de mise à disposition du linge sale dans les unités de soins. Pour résoudre leur problème, les auteurs utilisent un programme linéaire. Les résultats obtenus ont permis de réduire la distance parcourue de 32% par rapport à la distance parcourue par les agents.

Dans le domaine hospitalier, les produits ne sont pas les seuls centres d'intérêt dans la littérature. En effet, de très nombreuses études portent sur l'organisation du transport des patients. Nous avons choisi une référence qui traite de ce sujet et qui prend en compte de nombreuses contraintes, comme l'utilisation de différents type de véhicules. L'objectif du service de transport des patients à l'hôpital est de proposer un service efficace et rapide en tout point de l'hôpital. Les activités de transport de patients ne sont pas toutes connues à l'avance (seulement 10% des transports sont connus par jour), ce qui entraîne de nombreuses modifications sur les tournées des brancardiers. A titre d'exemple, (Beaudry, Laporte, Melo, & Nickel, 2006) ont modélisé leur problème comme un Dynamic Dial-A-Ride Problem (DARP). Les activités de transport sont définies par une origine où le patient est pris en charge, une destination où le patient est attendu, une date de prise en charge souhaitée, une date de livraison et un « véhicule » (brancard, fauteuil roulant,...). De plus, afin de limiter l'insatisfaction du patient, une durée maximum totale de parcours est définie. Etant donné le contexte hospitalier, une donnée supplémentaire vient compléter la définition de l'activité de transport : le degré d'urgence du transport. Cette donnée permet de définir le délai maximum que peut accepter le transport : date de prise en charge, durée de parcours ou date de fin de parcours. De plus, selon l'état du patient, un équipement spécifique pourra être nécessaire pour son transport, comme par exemple une bouteille d'oxygène. Une durée de désinfection du véhicule sera nécessaire à prendre en compte lorsque celui-ci aura pris en charge un patient atteint de maladies infectieuses. Pour assurer les transports de patients, le service dispose d'une flotte de véhicules hétérogène répartie dans plusieurs dépôts. Les véhicules peuvent transporter jusqu'à trois patients assis en fauteuil roulant, ou transporter un patient couché dans un brancard ou encore un patient assis en fauteuil et un patient sans dispositif particulier.

L'objectif de cette étude est d'affecter l'ensemble des activités de transport aux véhicules disponibles tout en respectant :

- Les dates de prises en charge des patients et les dates de livraison ;
- Les contraintes de dépôt qui exigent que les véhicules commencent et terminent leurs tournées à leur dépôt respectif ;
- Les contraintes de capacités des véhicules et des équipements ;
- Chaque lieu de prise en charge et de livraison d'une même activité de transport ne peut être visité que par le même véhicule (contrainte qui assure qu'un même véhicule assure la collecte et la livraison) ;
- Le patient doit être pris en charge à l'origine avant d'être laissé à la destination de son parcours (contrainte de précédence entre les étapes) ;
- La contrainte de durée de parcours du patient doit être respectée ;
- La contrainte de disponibilité des ressources doit être respectée ;
- La contrainte de service hospitalier : le transport des patients ne doit pas être interrompu.

L'objectif de leur étude est de minimiser trois critères : la durée totale de parcours, le total des retards et le total des attentes des brancardiers à l'origine d'une activité de transport. Pour résoudre ce problème, les auteurs proposent une heuristique composée de deux phases : la première phase consiste à insérer une nouvelle activité de transport dans une tournée existante (tournées construites à

partir des activités programmées), la seconde consiste à améliorer la solution issue de la première phase avec une recherche tabou. Deux types de voisinages sont utilisés : déplacement d'une activité de transport vers une autre tournée et déplacement d'une activité de transport dans une même tournée.

Cette approche a été testée avec des données réelles issues d'un hôpital allemand. Les résultats obtenus montrent que cette approche est capable de proposer des solutions de bonne qualité tout en prenant en compte des activités dynamiques. L'aspect qui a été le plus amélioré est le temps d'attente des patients pour obtenir un véhicule.

(Parker, Deane, & Holmes, 1977) proposent une analogie entre un problème de tournées de véhicules (1) et un problème d'ordonnancement sur machines parallèles (2). Le problème de tournées de véhicules considéré est le Vehicle Routing Problem. L'analogie entre les deux problèmes est récapitulée dans le Tableau 11 :

Éléments	VRP	Problème d'ordonnancement sur machines parallèles
Activités	Clients à visiter	Tâches à effectuer
Ressources	Véhicules	Machines
Durées de trajet	Matrice des durées de transports entre deux lieux	Durée nécessaire pour passer d'une tâche à une autre sur une même machine
Durée de service	Durées de déchargement	Durées de traitement sur les machines
Dépôt	Ville initiale	Etat initial
Critère	Distance totale parcourue	Makespan

Tableau 11 : Analogie entre le problème de tournées de véhicules et le problème d'ordonnancement sur machines parallèles selon (Parker, Deane, & Holmes, 1977)

Les auteurs ont utilisé cette méthode de transformation de problème pour résoudre un ensemble de problèmes d'ordonnancement sur des machines parallèles avec des données générées aléatoirement. Les résultats montrent la possibilité de résoudre un problème d'ordonnancement sur machines parallèles en le transformant en problème de tournées de véhicules.

La plupart des articles que nous avons étudiés ont une demande en transport dynamique avec plusieurs sites de consommation à desservir. Pour les problèmes décrits, les auteurs doivent construire des tournées tout en respectant un certain nombre de contraintes (contraintes de capacité des véhicules, contraintes du respect des dates de mise à disposition des charges à collecter,...) tout en optimisant des critères (nombre d'activités non réalisées, retard des activités,...). Dans leurs problèmes, les auteurs prennent en compte des contraintes de fenêtres de temps sur les sites à visiter permettant ainsi de gérer l'attente des véhicules. Cette attente ne tient pas compte de l'utilisation de ressources sur le site comme les quais. De plus, aucun d'entre eux ne propose de prendre en compte d'autres ressources telles que les chauffeurs. Par conséquent, le fait de gérer un nombre variable de ressources pour réaliser une activité n'apparaît pas non plus.

Notre problème de transport prend en compte différents types de ressources comme les chauffeurs, les véhicules et les quais du site de production. Nous avons un seul site de production équipé d'un nombre limité de quais de chargement et de déchargement et plusieurs sites de consommation. De plus, les chauffeurs ne participent pas au chargement ou au déchargement des véhicules sur le site de production. Nous devons donc gérer de nombreuses ressources différentes (véhicules, chauffeurs, quais) pour réaliser les transports et des attentes entre les phases qui conservent la ressource utilisée. Ces éléments ne nous permettent pas d'utiliser les approches présentées. De plus, les différentes

phases des activités de transport nécessitent un nombre variable de ressources. Un des problèmes qui permet de prendre en compte ce type de contrainte est le Resource Constrained Project Scheduling Problem. En effet, ce problème consiste à ordonnancer des activités composées d'étapes, nécessitant un nombre défini de ressources, tout en respectant le nombre de ressources disponibles, et ce, pour chaque étape.

4. Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)

Le RCPSP est un problème classique d'ordonnancement qui consiste à ordonnancer un ensemble de tâches, soumises à des contraintes de précédence et nécessitant des ressources disponibles en nombre limité, dans le but d'optimiser un ou plusieurs critère (s). Une des extensions du RCPSP, le RCPSP avec profil de demande en ressource variable nous a semblé pertinente pour la résolution de notre problème. Aussi après une présentation du problème, de sa formalisation mathématique, nous présentons l'analogie avec notre problème.

4.1. RCPSP avec profil de demande en ressource variable

4.1.1. Présentation

Le RCPSP est formulé par la donnée d'un ensemble d'activités $N = \{1, 2, \dots, n\}$ et d'un ensemble de ressources renouvelables $R = \{1, \dots, K\}$. Chaque ressource k est disponible en une quantité constante R_k . Chaque activité $j \in N$ a une durée opératoire p_j et nécessite pour sa réalisation une quantité constante $r_{j,k}$ de chaque ressource k .

La réalisation des activités est soumise à un certain nombre de contraintes telles que des contraintes temporelles et des contraintes de ressources. Les contraintes temporelles sont définies par les relations de précédence entre les activités et les contraintes de ressources vérifient le respect du nombre de ressources disponibles pour la réalisation des activités.

(Elkhyari, 2003) propose un exemple du RCPSP constitué de 6 activités utilisant deux types de ressources de capacités $R_1 = 3$ et $R_2 = 4$ (Figure 20). Le graphe représente les précédences entre les activités et le tableau fournit les durées opératoires et les quantités de ressources associées à chacune des six activités. Les activités 0 et 7 sont les activités fictives de début et de fin de projet.

j	0	1	2	3	4	5	6	7
p_j	0	2	4	2	8	4	4	0
$r_{j,1}$	0	2	1	2	1	3	1	0
$r_{j,2}$	0	3	2	1	2	4	2	0

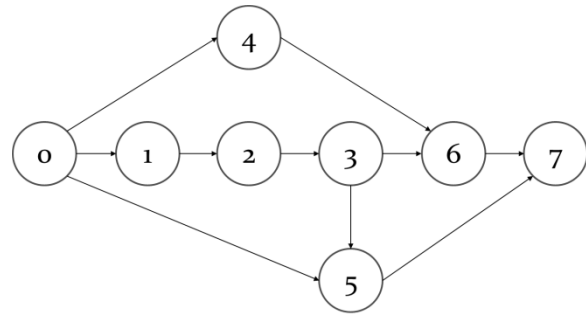


Figure 20 : Un exemple de RCPSP proposé par (Elkhyari, 2003)

La Figure 21 représente une solution réalisable du RCPSP définie dans la Figure 20.

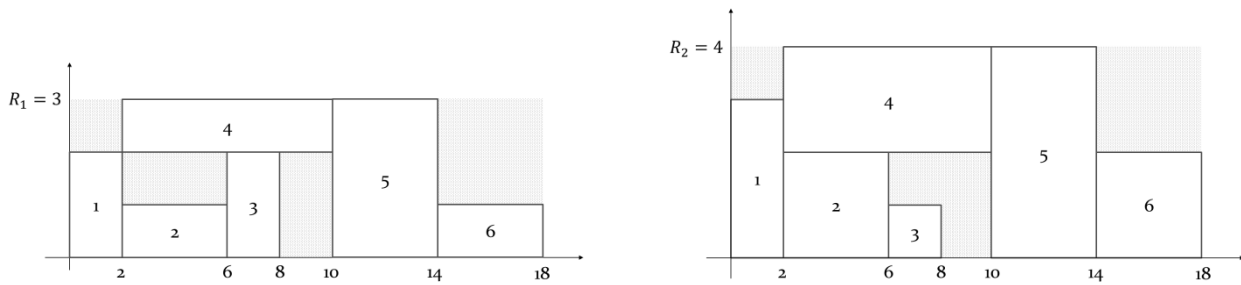


Figure 21 : Une solution réalisable de l'exemple (Figure 20)

Dans les modèles classiques du RCPSP, le nombre de ressources allouées à une activité est constant tout au long de son traitement. Dans un contexte industriel, cette hypothèse est très restrictive car la réalisation d'une activité est fréquemment découpée en plusieurs étapes dont les besoins en ressources sont distincts. A titre d'exemple, dans (Boutevin, 2003), une activité est découpée en trois étapes : installation, fabrication et désinstallation et les ressources humaines n'interviennent pas sur la totalité des étapes. « Cette variation du nombre de ressources requises au cours du traitement d'une activité peut entraîner des temps d'attente dans la réalisation des différentes étapes (dus à l'éventuelle non disponibilité des ressources) car nous n'imposons pas que deux étapes successives soient réalisées sans interruption. Par contre, si le nombre de ressources requises par une étape est inférieur ou égal au nombre de ressources requises par l'étape qui la précède pour chaque type de ressource, ce temps d'attente ne figure pas et l'étape débute dès la fin de l'étape précédente. La durée de chaque activité n'est alors plus connue à l'avance, seules les durées de chaque étape composant l'activité peuvent être fixées. Enfin, nous supposons que si deux étapes successives nécessitent des ressources communes, ces ressources ne sont pas libérées durant les périodes d'attente qui peuvent séparer ces deux étapes. »

Pour le RCPSP avec profil de demande en ressource variable, les activités sont décomposées en étapes :

- La durée de chaque étape est connue,
- Deux étapes ne sont pas obligatoirement réalisées en continu,
- Une étape est non préemptive,
- La quantité de ressources requises pour chaque étape est connue,
- Deux étapes successives ont des besoins en ressources différents pour au moins un type de ressource,
- Si deux étapes successives nécessitent des ressources communes, ces ressources ne sont pas libérées durant les périodes d'attente qui peuvent séparer ces deux étapes.

Nous donnons un exemple du RCPSP constitué de 5 activités, 4 activités sont décomposées en 3 étapes (A, B, D et E) et une activité est décomposée en deux étapes (C) utilisant deux types de ressources de capacités $R_1 = 4$ et $R_2 = 4$ (Figure 22). Le graphe représente les précédences entre les activités et le tableau fournit les durées opératoires et les quantités de ressources associées à chacune des étapes de chacune des activités. Ces activités fictives de début et de fin sont représentées par les activités S et F et n'ont qu'une seule étape.

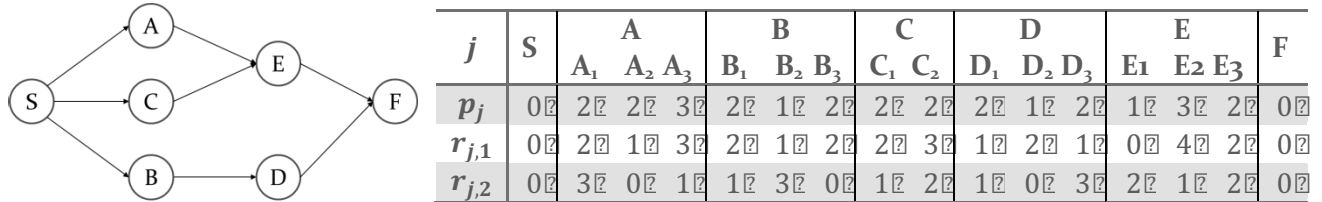


Figure 22 : Un exemple de RCPSP avec profil de demande en ressource variable

La Figure 23 représente une solution réalisable du RCPSP défini dans la Figure 22. Les parties grisées correspondent aux attentes de ressources.

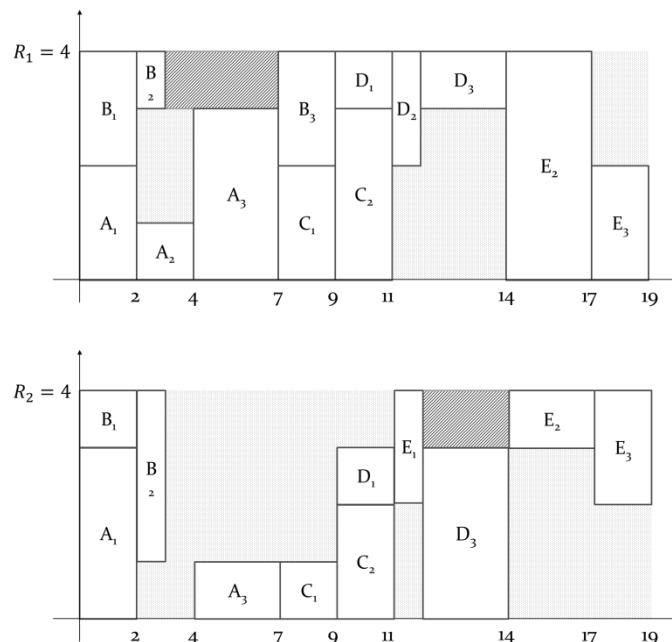


Figure 23 : Une solution réalisable de l'exemple (Figure 22)

Le problème classique du RCPSP a pour objectif de minimiser le makespan, c'est-à-dire la durée totale nécessaire pour réaliser l'ensemble des activités.

4.1.2. Modèle mathématique

L'horizon est découpé en périodes de longueur égale. Les notations utilisées pour la formulation mathématique du RCPSP avec profil de demande en ressource variable sont les suivantes (Boutevin, 2003) :

Données	Notation
Ensemble des activités	J
Nombre d'activités, $N = \text{card}(J)$ (y compris les activités fictives de début et de fin)	N
Borne supérieure du makespan en nombre de périodes	T
Ensemble de prédécesseurs de l'activité j	P_j
Date de fin au plus tôt de l'étape e de l'activité j	$EF_{j,e}$
Date de fin au plus tard de l'étape e de l'activité j	$LF_{j,e}$
Nombre de types de ressources	K
Nombre de ressources de type k	R_k
Nombre d'étapes de l'activité j	E_j
Durée de l'étape e de l'activité j	$p_{j,e}$
Quantité de ressources de type k requise par l'étape e de l'activité j	$r_{j,k,e}$

Tableau 12 : Notation des données pour le RCPSP avec profil de demande en ressource variable

Nous supposons que les activités fictives de fin N sont composées d'une seule étape de durée nulle.

Les variables utilisées sont :

$$x_{j,e,t} = 1, \text{ si l'étape } e \text{ de l'activité } j \text{ se termine à la période } t, 0 \text{ sinon}$$

Pour $j = 1, N; e = 1, E_j; t = 1, T$

La fonction objectif consiste à minimiser le makespan ou la date de fin de la dernière activité, à savoir l'activité fictive de fin (F) :

$$\min \left(\sum_{t=EF_{N,1}}^{LF_{N,1}} t \times x_{N,1,t} \right)$$

Sous contrainte de :

$$\sum_{t=EF_{j,e}}^{LF_{j,e}} x_{j,e,t} = 1, \text{ pour } j = 1, N; e = 1, E_j \quad 2.1$$

La Contrainte 2.1 assure que chaque étape de chaque activité se termine dans une seule période.

$$EF_{j,e} \leq \sum_{t=EF_{j,e}}^T t \times x_{j,e,t}, \text{ pour } j = 1, N; e = 1, E_j \quad 2.2$$

Cette contrainte assure que les dates de fin au plus tôt sont respectées.

$$\sum_{t=EF_{j,e}}^{LF_{j,e}} t \times x_{j,e,t} + p_{j,e+1} \leq \sum_{t=EF_{j,e+1}}^{LF_{j,e+1}} t \times x_{j,e+1,t}, \text{ pour } j = 1, N; e = 1, E_j - 1 \quad 2.3$$

La contrainte de précédence entre les étapes est vérifiée par la contrainte 2.3. L'étape e précède l'étape $e + 1$, ce qui signifie que l'intervalle de temps qui sépare la fin de l'étape e de l'activité j et la fin de l'étape $e + 1$ de la même activité j est au moins supérieure ou égale à la durée de l'étape $e + 1$.

$$\sum_{t=EF_{h,E_h}}^{LF_{h,E_h}} t \times x_{h,E_h,t} + p_{j,1} \leq \sum_{t=EF_{j,1}}^{LF_{j,1}} t \times x_{j,1,t}, \text{ pour } j = 1, N; h \in P_j \quad 2.4$$

La contrainte 2.4 vérifie le respect de la précédence entre les activités. Dans ce cas, si une activité h est le prédécesseur de l'activité j , alors l'intervalle de temps qui sépare la fin de la dernière étape de

l'activité h et la fin de la première étape de l'activité j est au moins supérieure ou égale à la durée de la première étape de l'activité j .

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^{E_j} r_{j,k,e} \times \sum_{t_1=t}^{t+p_{j,e}-1} x_{j,e,t_1} \\
 & + \sum_{j=1}^N \left(\sum_{e=1}^{E_j-1} \min(r_{j,k,e}; r_{j,k,e+1}) \right. \\
 & \times \left. \left(\sum_{t_1=t}^T (x_{j,e+1,t_1} - x_{j,e,t_1}) - \sum_{t_1=t}^{t+p_{j,e+1}-1} x_{j,e+1,t_1} \right) \right) \leq R_k
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

pour $k = 1, K; t = 1, T$

La contrainte 2.5 assure que pour chaque période et chaque type de ressources, le nombre de ressources utilisées est inférieur ou égal au nombre de ressources disponibles. En effet, cette contrainte vérifie que la somme du nombre de ressources utilisées par les activités en cours de réalisation et du nombre de ressources qui sont en attente, est en quantité inférieure ou égale aux ressources disponibles.

$$x_{j,e,t} \in \{0,1\}, \text{ pour } j = 1, N; t = 1, T \text{ et } e = 1, E_j \tag{2.6}$$

Les variables x sont binaires selon la contrainte 2.6.

4.2. Analogie avec le problème de transport

Nous avons mené notre étude en deux étapes. La première a consisté à dissocier l'étude des transports des contenants propres de celles des contenants sales. Nous référençons par la suite cette étape sous l'intitulé « Ordonnancement d'un seul type d'activité de transport ». La seconde étape a consisté à étudier simultanément l'organisation des distributions de contenants propres et de retour de contenant sale, étape nommée « Ordonnancement des deux types d'activité de transport ».

Etant donné les hypothèses, notre problème s'apparente plus à des problèmes d'ordonnancement des activités avec prises en compte des ressources plutôt qu'un problème de tournées de véhicules. Tout comme (Parker, Deane, & Holmes, 1977) a fait un parallèle entre un VRP et un problème d'ordonnancement sur machine parallèle, nous proposons un parallèle entre le RCPSP et notre problème.

Nous avons récapitulé les analogies possibles entre notre problème et le RCPSP dans le Tableau 13.

Problème du Resource Constrained Project Scheduling Problem	Problème d'ordonnancement des activités de transports
Tâches à effectuer	Activité de transport à réaliser
Plusieurs types de ressources	Véhicules, quais et chauffeurs
Durées de réalisation des tâches	Durées de chargement, de transport et de déchargement
Minimisation du Makespan	Minimisation de la somme des retards

Tableau 13 : analogie entre notre problème et le RCPSP

5. Ordonnancement d'un seul type d'activité de transport

L'objectif premier de cette étude est de dimensionner le nombre de ressources (véhicules, chauffeurs) nécessaires afin que les dates de mise à disposition des contenants propres proposées par les unités de production satisfassent les exigences des unités de consommation (date de fin souhaitée). L'hypothèse sous-jacente retenue est que les chauffeurs se concentrent uniquement pendant une période donnée au transport de contenants propres. Une telle hypothèse induit bien sûr un grand nombre de déplacements à vide puisque deux activités de transport de contenants propres sont alors obligatoirement séparées par une activité de transport à vide (Figure 24). Mais les transports sont alors réalisés au plus tôt dans la mesure où les chauffeurs ne sont pas retardés par d'autres chargements aux sites de consommation.

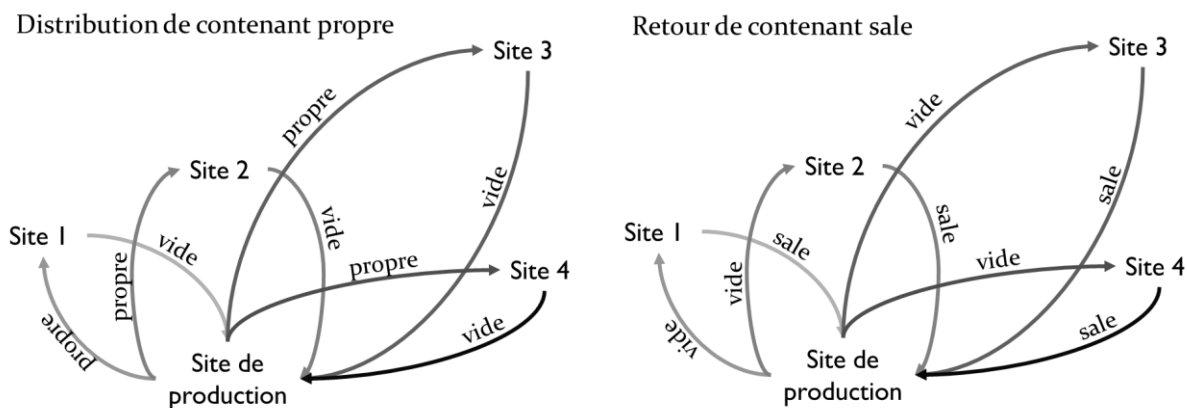


Figure 24 : Identification des transports à vide entre les activités

La diversité des ressources à prendre en compte dans ce problème de transport nous a amenés à envisager sa résolution grâce au modèle du RCPSP avec profil de demande en ressource variable. Nous montrons la modélisation proposée et le modèle mathématique associé pour chaque type d'activité de transport.

Les différences entre les problèmes d'ordonnancement des activités de distribution de contenant propre ou sale sont relativement minces. Nous trouvons de nombreux points communs :

- Les durées de transport entre le site de production et chacun des sites de consommation sont connues et supposées constantes ;
- Un chauffeur peut conduire n'importe quel véhicule et peut être amené à changer plusieurs fois de véhicule ;
- Une étape ne peut commencer que lorsque les ressources nécessaires sont disponibles ;
- Le nombre de chauffeurs utilisés à un instant donné est limité par le nombre de chauffeurs disponibles ;
- Le nombre de quais de chargement du site de production utilisés est limité par le nombre de quais disponibles ;
- Le nombre de véhicules utilisés à un instant donné est limité par le nombre disponible.

L'objectif est d'ordonner les activités de transport dans l'objectif de minimiser les retards tout en respectant les contraintes de disponibilité des ressources (chauffeurs, véhicules et quais du site de production) et les dates de début au plus tôt. Dans le cas où les retards sont nuls nous nous intéressons à la minimisation du makespan.

5.1. Distribution de contenant propre

5.1.1. Modélisation

Comme nous l'avons évoqué dans le modèle de connaissance, une activité de distribution de contenant propre est décomposée en trois phases :

- Phase 1 : le chargement des contenants dans le véhicule au site de production qui nécessite un véhicule et un quai de chargement ;
- Phase 2 : le transport de contenants propres du site de production au site de consommation qui nécessite le véhicule utilisé dans la phase 1 et un chauffeur ;
- Phase 3 : le déchargement du contenant au site de consommation qui nécessite le véhicule et le chauffeur utilisés dans la phase 2.

Etant données les hypothèses de notre étude, entre chaque activité de distribution de contenant propre, figure une activité de transport à vide du site de consommation au site de production. Nous avons décidé de considérer ce retour à vide comme la phase 4. Cette phase nécessite également un véhicule et un chauffeur, le même que la phase 3.

Seule une attente peut survenir entre les phases 1 et 2 si aucun chauffeur n'est disponible pour débiter le transport à la fin du chargement. En revanche, nous supposons que si le chargement du véhicule est terminé avant l'arrivée du chauffeur, le véhicule est déplacé pour libérer le quai. En fait, ce déplacement est pris en charge par des agents du site de production autres que les chauffeurs. Un chauffeur sera donc amené à utiliser plusieurs véhicules différents pendant sa journée de travail.

Etant données les ressources utilisées pour chaque phase, nous avons décidé de modéliser une telle activité par deux étapes au niveau du RCPSP comme indiqué sur la Figure 25.

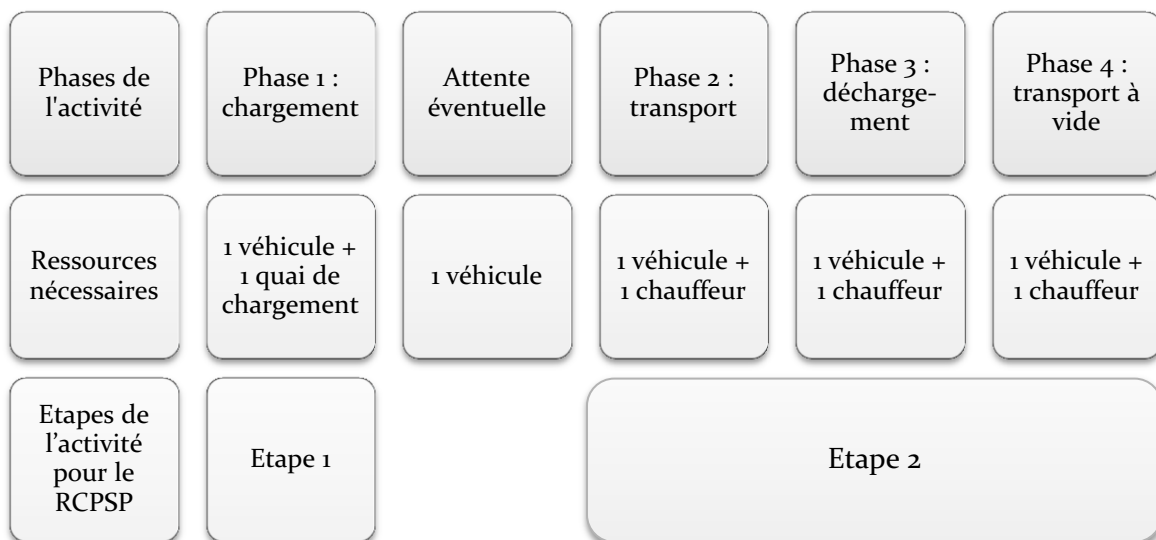


Figure 25 : Modélisation d'une activité de distribution de contenant propre

5.1.2. Modèle mathématique

En reprenant les notations du RCPSP avec profil de demande en ressource variable, chaque activité $j \in E_j$ de distribution de contenant propre du site de production à un site de consommation X est alors caractérisée par les données suivantes :

- Nombre d'étapes pour l'activité $j \in E_j$: 2 , pour $j = 1, N$
- Durée de la 1^{ère} étape : $p_{j,1}$ = durée du chargement du contenant ;

- Durée de la 2^{ème} étape : $p_{j,2}$ = somme de la durée de transport du site de production au site de consommation X, de la durée du déchargement au site de consommation X et de la durée du transport à vide du site de consommation X au site de production ;
- Date de fin au plus tôt de l'étape 1 de l'activité j : $EF_{j,1}$ = somme de la date de début au plus tôt de l'activité j et la durée de l'étape 1 de l'activité j ;
- Date de fin au plus tôt de l'étape 2 de l'activité j : $EF_{j,2}$ = somme de la date de début au plus tôt de l'activité j , de la durée de l'étape 1 et de la durée de l'étape 2 ;
- Date de fin au plus tard de l'étape 1 de l'activité j souhaitée : $LF_{j,1}$ = la date de fin souhaitée de déchargement à laquelle est soustraite la durée de déchargement et de transport entre le site de production et le site de consommation X ;
- Date de fin au plus tard de l'étape 2 de l'activité j souhaitée : $LF_{j,2}$ = la date de fin souhaitée de déchargement à laquelle on ajoute la durée du transport du site de consommation X au site de production ;
- Ensemble des prédécesseurs : $P_j = \emptyset$ (il n'y a pas de contrainte de précédence entre les activités).

Le nombre de type de ressources K est 3. Nous notons R_1 le nombre de véhicules, R_2 le nombre de chauffeurs et R_3 le nombre de quais de chargement au site de production. Le Tableau 14 précise les besoins en ressources pour chaque type de chaque étape.

	Nombre de ressources requises pour l'étape 1	Nombre de ressources requises pour l'étape 2
Véhicule	$r_{j,1,1} = 1$	$r_{j,1,2} = 1$
Chauffeur	$r_{j,2,1} = 0$	$r_{j,2,2} = 1$
Quai de chargement	$r_{j,3,1} = 1$	$r_{j,3,2} = 0$

Tableau 14 : Besoins en ressources des étapes

Les contraintes 2.1, 2.3, 2.4, 2.5 et 2.6 du modèle du RCPSP avec profil de demande en ressource variable peuvent alors être adaptées en fonction de ces données et en intégrant le fait que l'objectif est non plus la minimisation du makespan mais la minimisation des retards. La contrainte 2.4 de précédence entre les activités n'a plus lieu d'être. Enfin la contrainte 2.6 est inchangée.

Ces contraintes sont :

Les contraintes 2.7 et 2.8 sont obtenues à partir des contraintes 2.1 et 2.3 modifiées sur la borne supérieure du signe somme afin de prendre en compte que les tâches peuvent se terminer après leur date de fin au plus tard souhaitée.

$$\sum_{t=EF_{j,e}}^T x_{j,e,t} = 1, \text{ pour } j = 1, N, e = 1, 2 \quad 2.7$$

La Contrainte 2.7 assure que chaque étape de chaque activité se termine dans une seule période.

$$EF_{j,1} \leq \sum_{t=EF_{j,e}}^T t \times x_{j,1,t}, \text{ pour } j = 1, N \quad 2.8$$

Cette contrainte assure que les dates de fin au plus tôt sont respectées.

$$\sum_{t=EF_{j,1}}^T t \times x_{j,1,t} + p_{j,2} \leq \sum_{t=EF_{j,2}}^T t \times x_{j,2,t}, \text{ pour } j = 1, N \quad 2.9$$

La contrainte 2.5 est déclinée en 3 contraintes, une pour chaque type de ressource (la contrainte 2.10 pour les véhicules, la contrainte 2.11 pour les chauffeurs et la contrainte 2.12 pour les quais de chargements).

$$\sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^2 \sum_{t_1=t}^{t+p_{j,e}-1} x_{j,e,t_1} + \sum_{j=1}^N \left(\sum_{t_1=t}^T (x_{j,2,t_1} - x_{j,1,t_1}) - \sum_{t_1=t}^{t+p_{j,2}-1} x_{j,2,t_1} \right) \leq R_1 \quad 2.10$$

pour $t = 1, T$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{t_1=t}^{t+p_{j,2}-1} x_{j,2,t_1} \leq R_2, \text{ pour } t = 1, T \quad 2.11$$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{t_1=t}^{t+p_{j,1}-1} x_{j,1,t_1} \leq R_3, \text{ pour } t = 1, T \quad 2.12$$

A ces contraintes du modèle du RCPSP avec profil de demande en ressource variable, il convient d'ajouter deux contraintes :

- La contrainte concernant la mise à disposition des contenants au site de production, cette contrainte indique que nd contenants sont disponibles toutes les p périodes et se traduit de la façon suivante :

$$\sum_{t=1}^{pk} \sum_{j=1}^N x_{j,1,t} \leq k \times nd, \text{ pour } k = 1, \left\lceil \frac{N}{nd} \right\rceil \quad 2.13$$

k représente les « macro-périodes » de longueur p périodes. $\left\lceil \frac{N}{nd} \right\rceil$ représente le nombre de macro-périodes nécessaires pour mettre à disposition N activités de distribution de contenant propre. Ainsi, cette contrainte permet de vérifier que les dates de mise à disposition des contenants se fait selon une fréquence imposée.

- les contraintes permettant le calcul des retards. Si on note L_j le retard de l'activité j , ces contraintes s'écrivent :

$$L_j \geq \sum_{t=1}^T t \times x_{j,2,t} - LF_{j,2}, \text{ pour } j = 1, N \quad 2.14$$

$$L_j \geq 0, \text{ pour } j = 1, N \quad 2.15$$

Enfin, la fonction objectif concerne la minimisation de la somme des retards et s'écrit :

$$\min \sum_{j=1}^N L_j$$

5.2. Retour de contenant sale

Tout comme la distribution de contenant propre, nous proposons une modélisation des activités de retour de contenant sale en deux étapes.

5.2.1. Modélisation

Comme nous l'avons évoqué dans le modèle de connaissance, nous décomposons une activité de retour de contenant sale selon 3 phases :

- Phase 1 : le chargement des contenants dans le véhicule au site de consommation qui nécessite un véhicule et un chauffeur ;
- Phase 2 : le transport entre le site de consommation et le site de production qui nécessite le chauffeur et le véhicule utilisés pour la phase 1 ;
- Phase 3 : le déchargement des contenants au site de production qui nécessite le véhicule utilisé pour la phase 2 et un quai de déchargement.

Etant données les hypothèses de notre étude, entre chaque activité de retour de contenant sale, figure une activité de transport à vide du site de production au site de consommation. Nous avons décidé de considérer ce retour à vide comme la Phase 0. Cette phase nécessite également un véhicule et un chauffeur, les mêmes que ceux utilisés dans la phase 1.

Tout comme pour la modélisation de l'activité de transports de contenants propres, nous pouvons avoir une attente entre les phases 2 et 3 dans le cas où aucun quai n'est disponible à la fin du transport. Cette attente ne concerne que le véhicule, le véhicule sera placé au quai de déchargement du site de production par les agents du site de production.

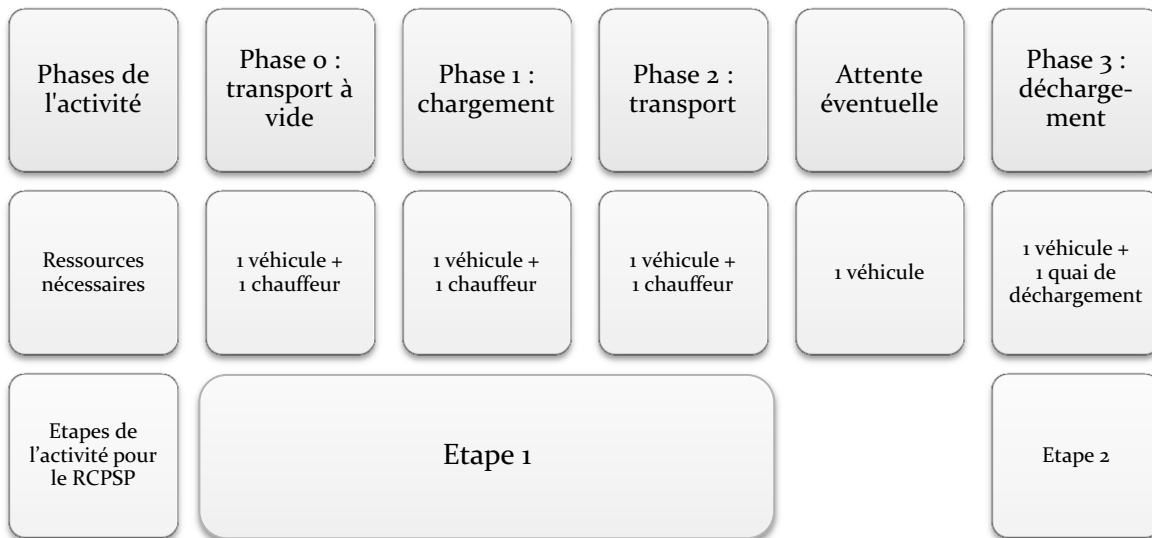


Figure 26 : Modélisation d'une activité de contenants sales

5.2.2. Modèle mathématique

Comme précédemment, nous reprenons les notations du RCPSP avec profil de demande en ressource variable, chaque activité j de retour de contenant sale du site de consommation X au site de production est caractérisée par :

- Nombre d'étape pour l'activité j : $E_j = 2$, pour $j = 1, N$
- Ensemble des prédécesseurs : $P_j = \emptyset$ (il n'y a toujours pas de contrainte de précédence entre les activités).
- Durée de la 1^{ère} étape : $p_{j,1}$ = somme de la durée de transport à vide du site de production au site de consommation X , de la durée du chargement au site de consommation X et de la durée du transport du site de consommation X au site de production ;
- Durée de la 2^{ème} étape : $p_{j,2}$ = durée du déchargement du contenant au site de production ;
- Date de fin au plus tôt de l'étape 1 de l'activité j : $EF_{j,1}$ = la date de début de chargement à laquelle on ajoute la durée du chargement au site de consommation et la durée du transport retour au site de production

- Date de fin au plus tôt de l'étape 2 de l'activité j : $EF_{j,2}$ = la date de fin au plus tôt de l'étape 1 à laquelle on ajoute la durée de la seconde étape ;
- Date de fin au plus tard de l'étape 1 de l'activité j souhaitée : $LF_{j,1}$ = la date de fin souhaitée de déchargement à laquelle est soustraite la durée de déchargement ;
- Date de fin au plus tard de l'étape 2 de l'activité j souhaitée : $LF_{j,2}$ = la date de fin souhaitée de déchargement.

Le nombre de type de ressources K est 3. Nous notons R_1 le nombre de véhicules, R_2 le nombre de chauffeurs et R_3 le nombre de quais de déchargement au site de production. Le Tableau 14 précise les besoins en ressources pour chaque type de chaque étape.

	Nombre de res- sources requises pour l'étape 1	Nombre de res- sources requises pour l'étape 2
Véhicule	$r_{j,1,1} = 1$	$r_{j,1,2} = 1$
Chauffeur	$r_{j,2,1} = 1$	$r_{j,2,2} = 0$
Quai de déchargement	$r_{j,3,1} = 0$	$r_{j,3,2} = 1$

Tableau 15 : Besoins en ressources des étapes

Nous retrouvons les mêmes contraintes 2.7, 2.8, 2.9 et 2.10 décrites dans le paragraphe précédent. Seules les contraintes du respect du nombre de chauffeurs disponibles et du nombre de quais de déchargement changent. Ces nouvelles contraintes sont :

$$\sum_{j=1}^N \sum_{t_1=t}^{t+p_{j,1}-1} x_{j,1,t_1} \leq R_2, \text{ pour } t = 1, T \quad 2.16$$

La contrainte pour le respect du nombre de chauffeurs disponibles modifie la contrainte 2.5. Dans le cas des activités de transport de contenant sale, Le chauffeur ne participe pas au déchargement (étape 2), ainsi, les valeurs de $r_{j,k,e}$ sont $r_{j,2,1} = 1$ et $r_{j,2,2} = 0$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{t_1=t}^{t+p_{j,2}-1} x_{j,2,t_1} \leq R_3, \text{ pour } t = 1, T \quad 2.17$$

De même que pour les quais de chargement, les quais de déchargement sont pris en compte dans le cas de transports de contenants sales, de ce fait $r_{j,3,1} = 0$ et $r_{j,3,2} = 1$.

La fonction objectif est de minimiser le retard total, et est définie exactement de la même manière que précédemment, selon les contraintes 2.14 et 2.15. La contrainte 2.11 sur la mise à disposition des contenants n'a plus de raison d'être.

5.3. Mise en œuvre et résultats

L'approche proposée a été utilisée pour dimensionner le nombre de chauffeurs et de véhicules pour la livraison des repas. Les résultats obtenus nous ont amenés à nous intéresser à la collecte des contenants sales. Nous montrons que notre modèle est indépendant du type de produit : nous l'avons utilisé sur la distribution du linge propre avec l'objectif de minimiser le makespan. Pour l'ensemble des tests, le pas de temps considéré est de 5 minutes.

5.3.1. Le transport des repas

Dans un premier temps, le CHU souhaitait que les chauffeurs alternent distribution de contenant propre et de retour de contenant sale, ce afin de permettre le nettoyage des véhicules après le retour

de contenant sale. Nous avons donc étudié séparément les deux types d'activités. A la demande des responsables le périmètre de l'étude se limite aux sites de GM, HE et HN.

5.3.1.1. Activité de distribution de contenant propre

Activités du matin

Dans un premier temps, nous avons effectué nos tests avec les données qui concernent les 6 livraisons de repas entre 9h30 et 11h20. Ces livraisons correspondent aux activités de transports de contenants propres au départ de l'Unité Centrale de Production Alimentaire (UCPA) et à destination de deux sites : L'Hôpital Estaing (HE) et Gabriel Montpied (GM). Les 6 activités de transport de contenants propres, notées A, B, ..., F utilisent trois types de ressources : des véhicules, des chauffeurs et 2 quais de chargement. La fréquence de mise à disposition des contenants propres est de 2 contenants toutes les 30 minutes. Le Tableau 16 fournit les durées opératoires et les dates de fin souhaitées. L'heure de début de planification est 9h30.

j	A		B		C		D		E		F	
Site	HE		HE		GM		GM		GM		GM	
e	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
$p_{j,e}$	0h10	0h45	0h10	0h45	0h10	0h30	0h10	0h30	0h10	0h30	0h10	0h30
$EF_{j,e}$	9h40	10h25	9h40	10h25	9h40	10h10	9h40	10h10	9h40	10h10	9h40	10h10
$LF_{j,e}$	10h40	11h25	10h40	11h25	10h50	11h20	10h50	11h20	10h50	11h20	10h50	11h20

Tableau 16 : Durées opératoires et les dates de fin souhaitées pour les transports de contenants propres

Pour déterminer la date de déchargement souhaitée des chariots repas, la date de prise de repas des patients sert de point de départ, à laquelle sont retirées les durées de remise à température des repas et de distribution des chariots dans les unités de soins. La date de fin au plus tard de l'étape 1 de l'activité j ($LF_{j,1}$) est définie à partir de la date de fin souhaitée de déchargement à laquelle sont soustraites les durées de déchargement et de transport entre le site de production et le site de consommation. La date de fin au plus tard de l'étape 2 de l'activité j ($LF_{j,2}$) est déterminée à partir de la date de fin souhaitée de déchargement à laquelle est ajoutée la durée du transport retour au site de production (Figure 27).

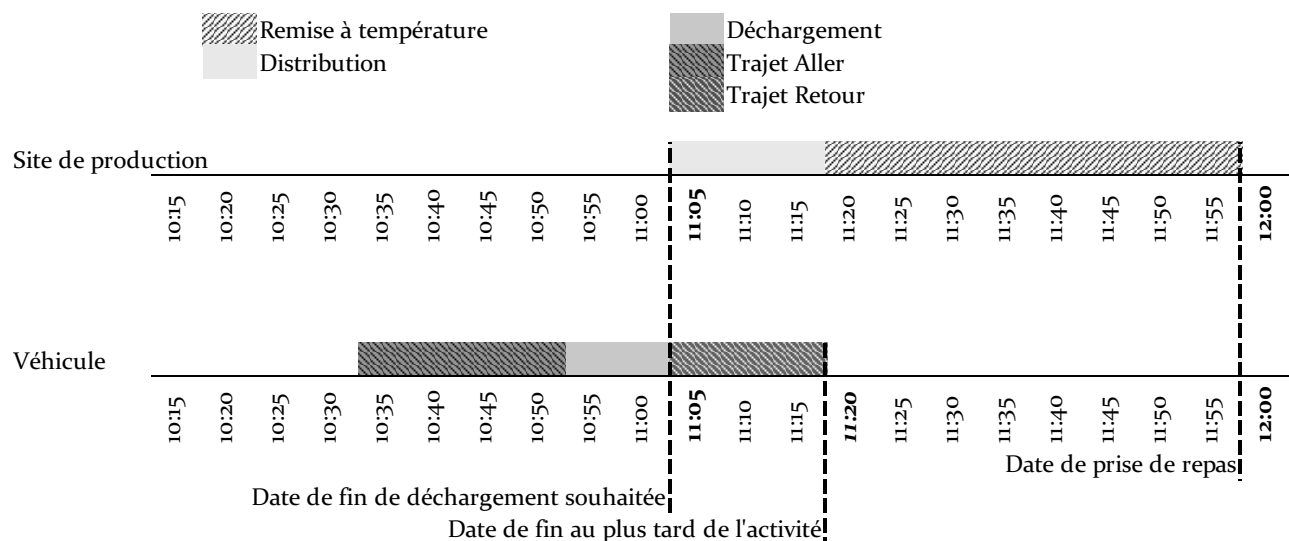


Figure 27 : Exemple de détermination de date au plus tard d'une activité de transport de chariots repas et de date de fin de déchargement souhaitée

Nous avons résolu ce problème en utilisant le logiciel « CPLEX ». Nous avons effectué des tests en faisant varier le nombre de ressources disponibles (véhicules et chauffeurs), sachant que 2 quais de

chargement sont disponibles. Nous avons indiqué le retard obtenu pour les sites de consommation et la durée d'exécution pour chaque variation du nombre de ressources dans le Tableau 17.

Ressources		Retard (en minutes)		Durée exécution
R ₁ Véhicules	R ₂ Chauffeurs	HE	GM	
4	4	0	0	<1s
3	3	0	0	<1s
3	2	0	5	<1s
2	2	5	10	3s

Tableau 17 : Résultats obtenus pour l'ordonnancement des activités de transports de contenants propres

La solution obtenue avec 3 véhicules et 2 chauffeurs est représentée pour la Figure 28. Nous constatons un retard indiqué par le trait épais sur l'activité F₂. Ce retard est lié à l'utilisation des chauffeurs. En effet, les deux chauffeurs enchainent toutes les activités, alors que le véhicule est en attente après le chargement de contenant, attente indiquée par la partie grisée entre F₁ et F₂ et E₁ et E₂.

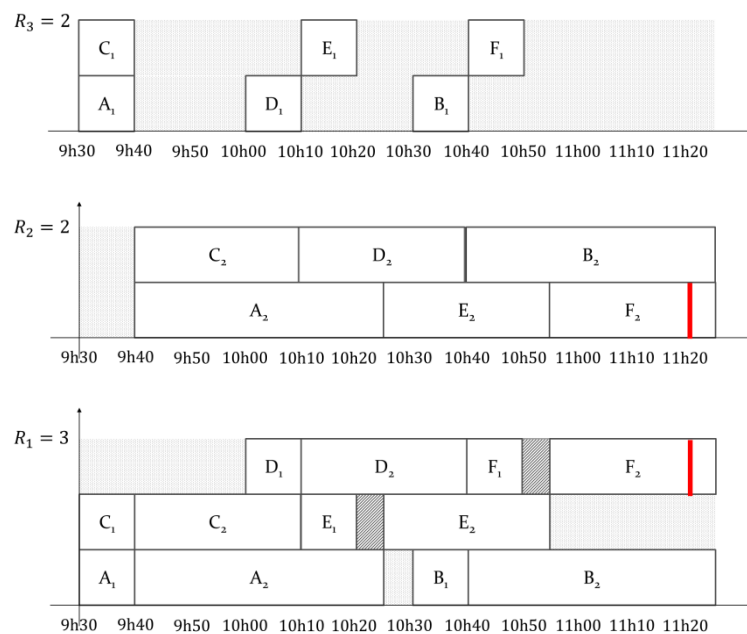


Figure 28 : Représentation des résultats obtenus avec 3 véhicules et 2 chauffeurs

Les transports de l'après-midi

Nous avons effectué nos tests avec les données qui concernent les livraisons de repas entre 15h et 17h. Ces livraisons correspondent aux activités de transport de contenants propres au départ de l'Unité Centrale de Production de repas (UCP) et à destination de trois sites : L'Hôpital Estaing (HE), Gabriel Montpied (GM) et l'Hôpital Nord (HN). La fréquence de mise à disposition des contenants propres est de 20 chariots toutes les 30 minutes. Le Tableau 18 fournit les durées opératoires et les dates de fin souhaitées. L'heure de début de planification est 15h. Les résultats sont donnés dans le Tableau 19.

j	A'		B'		C'		D'		E'		F'		G'	
Site	HE		HE		GM		GM		GM		GM		HN	
e	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
$p_{j,e}$	0h10	0h45	0h10	0h45	0h10	0h30	0h10	0h30	0h10	0h30	0h10	0h30	0h10	0h50
EF _{j,e}	14h40	15h25	14h40	15h25	14h40	15h10	14h40	15h10	14h40	15h10	14h40	15h10	14h40	15h30
LF _{j,e}	16h40	17h25	16h40	17h25	16h50	17h20	16h50	17h20	16h50	17h20	16h50	17h20	16h40	17h30

Tableau 18 : Durées opératoires et quantités de ressources utilisées pour les transports de contenants propres

Ressources		Retard (en minutes)			Durée exécution
Véhicules	Chauffeurs	HE	GM	HN	
4	4	0	0	0	<1s
4	3	0	0	0	<1s
3	3	0	0	0	<1s
3	2	0	0	0	<1s
2	2	0	0	0	<1s

Tableau 19 : Résultats obtenus pour l'ordonnancement des activités de transports de contenants propres

Au vu des résultats, la solution comportant 3 véhicules et 2 chauffeurs semble être la plus intéressante, les 5 minutes de retard pour les activités du matin pouvant être absorbées par les unités de consommation.

5.3.1.2. Activité de retour de contenant sale

Activités du matin

Nous avons également réalisé des tests pour les activités de transport de contenants sales. L'objectif est de collecter les chariots repas avant l'ouverture de la ligne de production. Pour notre exemple, nous avons des chariots repas à collecter dans deux sites : HE et GM. Un seul quai de déchargement est disponible. Le Tableau 20 fournit les durées opératoires et les dates de fin souhaitées. L'heure de début de planification est 6h. Les résultats sont donnés dans le Tableau 21.

j	H		I		J		K		L		M	
Site	HE		HE		GM		GM		GM		GM	
e	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
$p_{j,e}$	0h45	0h10	0h45	0h10	0h30	0h10	0h30	0h10	0h30	0h10	0h30	0h10
EF _{j,e}	6h45	6h55	6h45	6h55	6h30	6h40	6h30	6h40	6h30	6h40	6h30	6h40
LF _{j,e}	9h10	9h20	9h10	9h20	9h10	9h20	9h10	9h20	9h10	9h20	9h10	9h20

Tableau 20 : Durées opératoires et quantités de ressources utilisées pour les transports de contenants sales

Véhicules	Chauffeurs	Retards (minutes)	Durée exécution
4	4	0	<1s
3	3	0	<1s
3	2	0	<1s
2	2	0	1s
2	1	20	1s

Tableau 21 : Résultats obtenus pour l'ordonnancement des activités de transports de contenants sales

Les dates de fin souhaitées pour les transports de contenants sales permettent de réaliser l'ensemble des activités avec un nombre très limité de ressources, sans entraîner de retard, étant donné les dates de fin souhaitées.

Activités de l'après-midi

Nous avons également réalisé des tests pour les activités de retour de contenant sale du début d'après-midi. L'objectif est de collecter les chariots repas avant l'ouverture de la ligne de production l'après-midi. Nous avons des chariots repas à collecter en début d'après-midi dans deux sites : HE et GM. Le Tableau 22 fournit les durées opératoires et les dates de fin souhaitées. L'heure de début de planification est 13h30.

j	H'		I'		J'		K'		L'		M'	
Destination	HE		HE		GM		GM		GM		GM	
e	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
$p_{j,e}$	0h45	0h10	0h45	0h10	0h30	0h10	0h30	0h10	0h30	0h10	0h30	0h10
$EF_{j,e}$	15h15	15h25	15h15	15h25	15h	15h10	15h	15h10	15h	15h10	15h	15h10
$LF_{j,e}$	15h50	16h	15h50	16h	15h50	16h	15h50	16h	15h50	16h	15h50	16h

Tableau 22 : Durées opératoires et quantités de ressources utilisées pour les transports de contenants sales

Ressources		Retard (en minutes)		Durée exécution
Véhicules	Chauffeurs	HE	GM	
4	4	0	0	<1s
3	3	0	20	<1s
3	2	5	40	<1s
2	2	55	50	1s

Tableau 23 : Résultats obtenus pour l'ordonnancement des activités de transports de contenants sales

Les résultats obtenus ont été présentés aux responsables des transports du CHU. Bien que des solutions existent sans entraîner de retard pour une ouverture de chaîne à 15h, le nombre de ressources nécessaires pour respecter les dates de livraison au plus tard est trop important. Le résultat avec 3 véhicules et 3 chauffeurs intéressent ces derniers, mais le fait d'avoir un retard de 20 minutes pour le retour des contenants, inquiètent les responsables de l'unité de production de repas.

On constate que l'organisation qui consiste à avoir une alternance propre/sale matin et après-midi ne peut pas être appliquée en tant que telle, car les délais très courts de l'après-midi ne permettent pas d'assurer le nettoyage des véhicules. En effet, les retards observés pour le retour des contenants sales ont un impact sur les dates de début de distribution des contenants propres qui n'ont pas une marge suffisante pour absorber ces retards. Par conséquent, le CHU a décidé de relâcher la contrainte de l'alternance propre/sale tout en maintenant un nettoyage quotidien du véhicule.

5.3.2. Le transport du linge

En ce qui concerne les transports de linge, avec un faible nombre de ressources, il n'y a pas de retard car les dates de fin souhaitées sont peu contraignantes. Ainsi, comme nous souhaitons illustrer l'adéquation de notre modèle à un autre type de produit que les repas, nous avons testé notre modèle sur les activités de distribution du linge propre du matin avec l'objectif de minimiser le makespan.

Le nombre d'activités de transports varie en fonction des jours de la semaine. Nous avons décidé d'étudier les différents jours de la semaine de la phase 1. Le lundi, il y a 13 activités, du mardi au jeudi 14 et le vendredi 16. Pour chaque jour de la semaine, nous avons utilisé notre méthode et obtenu les résultats décrits dans le Tableau 24.

Ressources		Lundi		Mardi au jeudi		Vendredi	
Véhicules	Chauffeurs	Makespan (en min)	Durée exécution	Makespan (en min)	Durée exécution	Makespan (en min)	Durée exécution
4	4	150	10s	155	7s	160	11s
4	3	155	4s	160	10s	175	37s
3	3	185	24s	195	20s	205	22s
3	2	215	10s	225	15s	240	31s
2	3	265	42s	280	41s	300	46s
2	2	265	35s	280	34s	300	39s
2	1	405	27s	430	40s	455	24s

Tableau 24 : résultats obtenus pour le linge propre

Nous avons évalué la borne inférieure (somme des durées de transport de toutes les activités) pour le cas où un seul chauffeur travaille, nous obtenons un makespan de 395 pour le lundi, 420 pour le mardi au jeudi et 445 pour le vendredi.

6. Ordonnancement de deux types d'activité de transport

En traitant les transports par type d'activité, nous n'avons pas pris en compte les enchainements possibles pour les deux types d'activités de transport. En effet, à la fin d'une distribution de contenant propre, le véhicule et le chauffeur peuvent alors effectuer un chargement de contenants sales avant de retourner au site de production. Il existe de nombreuses conditions pour la réalisation d'un transport à vide, nous les listons dans le prochain paragraphe.

6.1. Hypothèses et modélisation

Comme nous l'avons évoqué, l'enchainement de deux activités de transport par un même chauffeur peut nécessiter la réalisation d'un transport à vide. Ce transport à vide intervient dans des cas très précis que nous avons identifiés (Tableau 25).

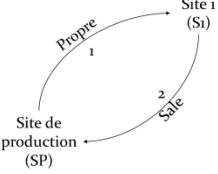
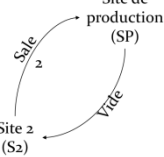
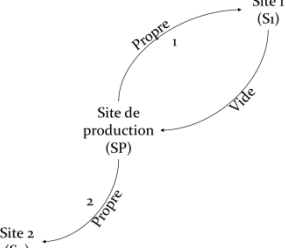
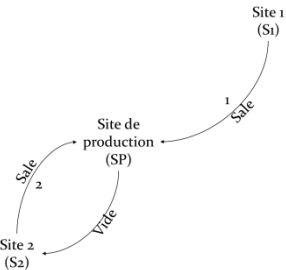
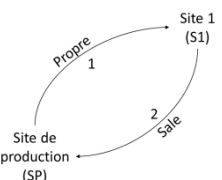
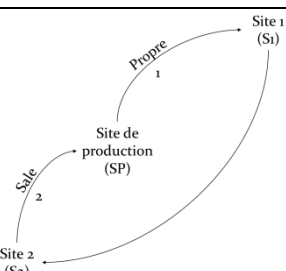
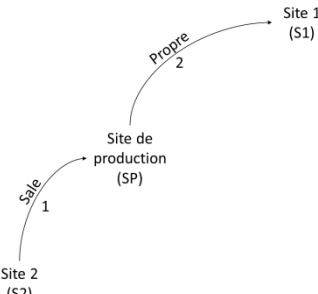
Représentation	Durée du (des) transport(s) à vide	Remarques
	1 transport à vide de durée : $S_1 \rightarrow SP$	Lorsqu'aucune activité ne succède une activité de distribution de contenant propre, un transport à vide est effectué entre le site de consommation et le site de production.
	1 transport à vide de durée : $SP \rightarrow S_2$	Lorsqu'aucune activité ne précède une activité de retour de contenant sale, un transport à vide est effectué entre le site de production et le site de consommation.
	1 transport à vide de durée : $S_1 \rightarrow SP$	Deux activités de distribution de contenant propre se suivent, un transport à vide devra alors être effectué entre le site de consommation et le site de production.
	1 transport à vide de durée : $SP \rightarrow S_2$	Deux activités de retour de contenant sale se suivent, un transport devra également être effectué entre le site de production et le site de consommation,
	Aucun transport à vide	Une activité de distribution de contenant propre précède une activité de retour de contenant sale. Si le site-destination de l'activité de distribution de contenant propre est identique au site-origine de l'activité de retour de contenant sale, alors aucun transport à vide ne sera réalisé,
	1 transport à vide de durée : $S_1 \rightarrow S_2$	Une activité de distribution de contenant propre précède une activité de retour de contenant sale. Si le site-destination de l'activité de distribution de contenant propre est différent du site-origine de l'activité de retour de contenant sale, alors un transport à vide sera réalisé entre les deux sites de consommation,
	Aucun transport à vide	Une activité de retour de contenant sale précède une activité de distribution de contenant propre, le site-destination de l'activité de retour de contenant sale et le site-origine de l'activité de distribution de contenant propre sont forcément identiques et aucun transport à vide ne sera réalisé.

Tableau 25 : cas d'enchaînement d'activités

Les hypothèses prises en compte dans ce problème sont communes avec les hypothèses présentées pour le problème d'ordonnancement d'un seul type d'activité à l'exception de celle concernant les transports à vide.

Au niveau de la modélisation, l'intégration du transport à vide dans les activités de distribution des contenants propres ou de retour des contenants sales n'a plus lieu d'être. Nous sommes toutefois repartis de la modélisation à l'aide du RCPSP avec profil de demande en ressources variable. nous montrons, dans un premier temps, comment nous modélisons les activités de distribution des contenants propres et les activités de retour des contenants sales. Dans un second temps, nous expliquons comment nous avons intégré les transports à vide dans le modèle du RCPSP. Nous nous sommes en fait inspirés du modèle du Flow Shop Hybride (FSH) avec temps de montage dépendant de la séquence.

6.1.1. Modélisation des activités

Comme mentionné dans le modèle de connaissance, l'activité de distribution de contenant propre est décomposée en trois phases (Figure 29) :

- Phase 1 : le chargement des contenants dans le véhicule au site de production qui nécessite un véhicule et un quai de chargement ;
- Phase 2 : le transport de contenants propres du site de production au site de consommation qui nécessite le véhicule utilisé pour la phase 1 et un chauffeur ;
- Phase 3 : le déchargement du contenant au site de consommation qui nécessite le véhicule et le chauffeur utilisés pour la phase 2.

Au niveau du RCPSP, cette activité est donc modélisée par deux étapes (Figure 29).

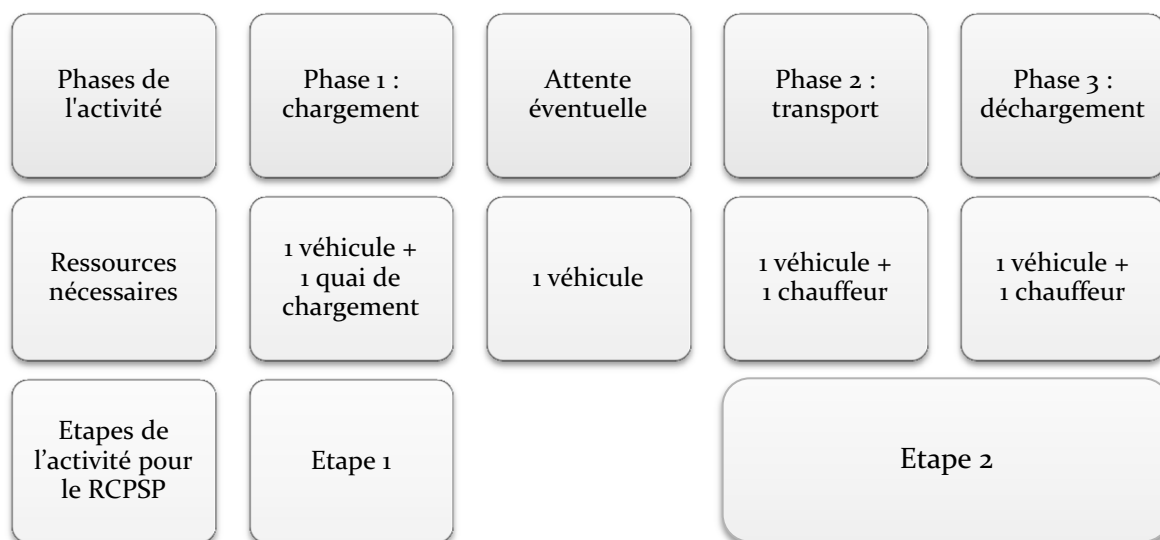


Figure 29 : Modélisation d'une activité de distribution de contenant propre

L'activité de retour de contenant sale est décomposée en trois phases (Figure 30) :

- Phase 1 : le chargement des contenants dans le véhicule au site de consommation qui nécessite un véhicule et un chauffeur ;
- Phase 2 : le transport de contenants propres du site de consommation au site de production qui nécessite le véhicule et le chauffeur utilisés pour la phase 1 ;
- Phase 3 : le déchargement du contenant au site de production qui nécessite le véhicule et un quai de déchargement.

Au niveau du RCPSP, cette activité est également modélisée en deux étapes (Figure 30).

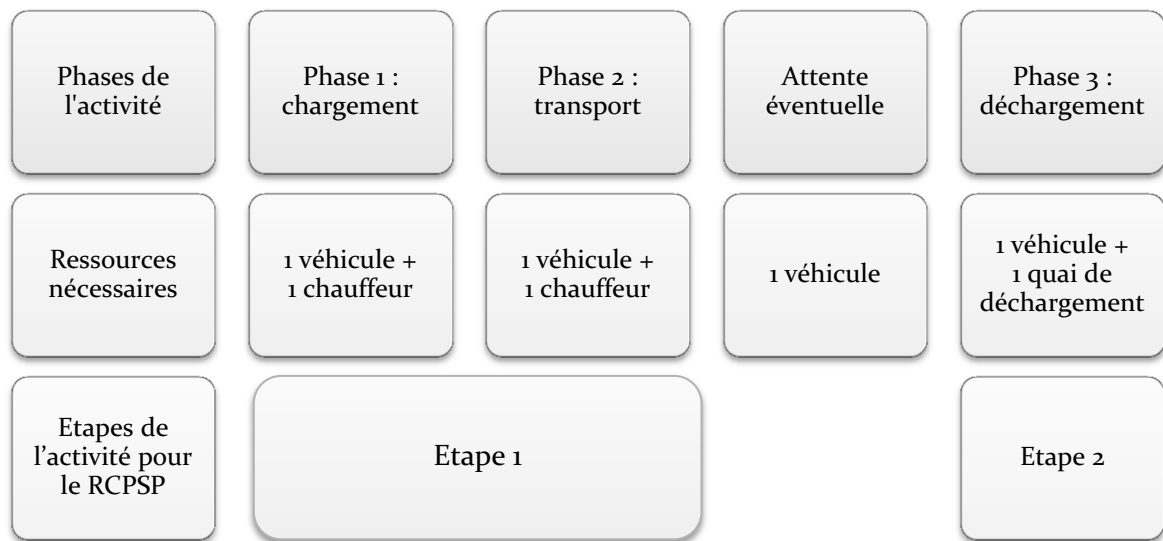


Figure 30 : Modélisation d'une activité de retour de contenant sale

6.1.2. Intégration du transport à vide

Les transports à vide ne peuvent pas être modélisés comme des activités au sens du RCPSP dans la mesure où leur existence dépend de l'activité précédente et de l'activité suivante. Ainsi, avons-nous décidé de modéliser le transport à vide entre deux activités de transport comme un temps de set up dépendant de la séquence. Nous sommes repartis du FSH avec temps de montage dépendant de la séquence. Nous rappelons le modèle mathématique correspondant dans un premier temps et dans un second temps nous expliquons le parallèle fait entre les transports à vide et ces temps de montage.

6.1.2.1. Problème du Flow shop hybride avec temps de montage dépendant de la séquence

Le flow shop hybride à plusieurs étages est un flow shop pour lequel chaque tâche doit subir différentes opérations. Chaque opération doit être réalisée sur une unique machine choisie parmi un ensemble de machines formant un étage. Chaque machine est associée à un et un seul étage et un étage est composé de plusieurs machines. A la différence du flow shop classique, pour résoudre ce type de problème, il ne s'agit pas de déterminer seulement une date de début d'exécution pour chaque opération, mais aussi une affectation à une machine donnée.

La modélisation mathématique de ce problème (Grangeon, 2001) se présente comme suit :

Données	Notation
Nombre de produits	n
Nombre d'étages	m
Nombre de machines à l'étage $j, j = 1, m$	M_j
Temps de traitement du produit $i, i = 1, n$, sur une machine k de l'étage $j, j = 1, m$	$t_{i,j,k}$
Temps de montage du produit $i', i' = 1, n$ s'il suit le produit $i, i = 1, n$ sur la machine $k, k = 1, M_j$ de l'étage $j, j = 1, m$	$s_{i,i',j,k}$

Tableau 26 : Notation des données pour le Flow Shop Hybride

Les variables utilisées sont :

$x_{i,i',j,k}$	= 1, si le produit i' est ordonnancé immédiatement après le produit i sur la machine k de l'étage j , 0 sinon
$x_{0,i',j,k}$	= 1, si le produit i' est le premier sur la machine k de l'étage j , 0 sinon
$x_{i,0,j,k}$	= 1, si le produit i est le dernier sur la machine k de l'étage j , 0 sinon
$C_{i,j}$	Date de sortie de produit i de l'étage j
C_{max}	Makespan

Pour la modélisation de ce problème, nous introduisons HV constante supérieure au makespan de toute solution.

L'objectif de ce problème est de minimiser le makespan :

$$\min C_{max}$$

Sous contrainte de :

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq i'}}^n \sum_{k=1}^{M_j} x_{i,i',j,k} = 1, \text{ pour } i' = 1, n; j = 1, m \quad 2.18$$

$$\sum_{i'=0}^n x_{0,i',j,k} \leq 1, \text{ pour } j = 1, m; k = 1, M_j \quad 2.19$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq i'}}^n x_{i,i',j,k} - \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq i'}}^n x_{i',i,j,k} = 0, \text{ pour } i' = 1, n; j = 1, m; k = 1, M_j \quad 2.20$$

$$C_{i',j} \geq C_{i,j} + \sum_{k=1}^{M_j} x_{i,i',j,k} \times (s_{i,i',j,k} + t_{i',j,k}) + \left(\left(\sum_{k=1}^{M_j} x_{i,i',j,k} \right) - 1 \right) \times HV, \quad 2.21$$

pour $i = 0, n; i' = 1, n; j = 1, m$

$$C_{i',j} \geq C_{i',j-1} + \sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^{M_j} x_{i,i',j,k} \times (s_{i,i',j,k} + t_{i',j,k}), \text{ pour } i' = 1, n; j = 2, m \quad 2.22$$

$$C_{i,m} \leq C_{max}, \text{ pour } i = 1, n \quad 2.23$$

$$0 \leq x_{i,i',j,k} \leq 1, \text{ pour } i = 0, n; i' = 0, n; j = 1, m; k = 1, M_j \quad 2.24$$

$$x_{i,i,j,k} = 0, \text{ pour } i = 0, n; j = 1, m; k = 1, M_j \quad 2.25$$

Les contraintes 2.16, 2.17 et 2.18 vérifient que chaque produit est affecté à une et une seule machine à chaque étage et n'a qu'un seul prédécesseur et qu'un seul successeur. Les contraintes 2.19 et 2.20 prennent en compte la durée de montage qui dépend de la séquence des produits sur la machine. La

contrainte 2.22 vérifie que la date de sortie du produit i' suivant le produit i est inférieure ou égale à la date de sortie du produit i auquel est rajouté le temps de montage.

6.1.2.2. Modélisation des transports à vide

Les transports à vide peuvent être modélisés par des temps de montage dépendant de la séquence de la façon suivante :

- Si l'activité de transport précédente a un site destination identique au site origine de l'activité suivante alors la durée du transport à vide est nulle, ce qui revient à considérer un temps de montage nul,
- Si l'activité de transport précédente a un site destination différent du site origine de l'activité suivante alors la durée du transport à vide (donc le temps de montage) correspond à la durée de trajet entre les deux sites.

La Figure 31 donne un exemple de construction de cette matrice des temps de montage ($z_{j,j'}$). Dans cet exemple, on dénombre trois activités de distribution de contenant propre à réaliser entre le site de production et les sites 1, 2 et 4 (DCP1, DCP2 et DCP3) et deux activités de retour de contenant sale (RCS1 et RCS2).

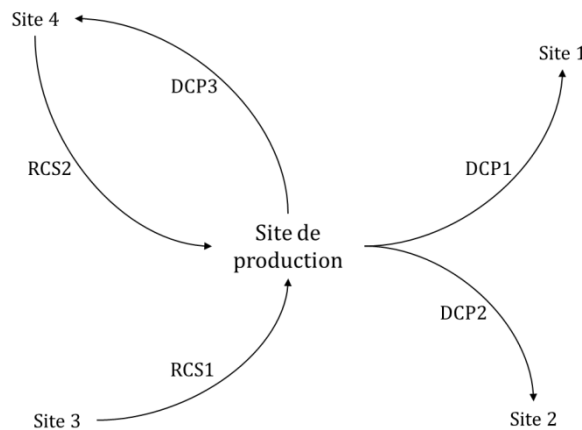


Figure 31 : Identification des valeurs de $z_{j,j'}$

Le Tableau 27 donne les temps de transport à vide et donc les temps de montage. L'activité 0 est une activité fictive du début de l'ordonnancement. Dans le cas où les activités 0 et DCP1 se suivent, la durée du transport à vide est nulle, il n'y a pas de transport à vide. Dans le cas où les activités DCP2 et DCP3 s'enchaînent, la durée du transport à vide est égale à la durée du parcours entre le site S2 et le site de production.

$j \backslash j'$	DCP1	DCP2	DCP3	RCS1	RCS2
0	0	0	0	SP→S3	SP→S4
DCP1	?	S1→SP	S1→SP	S1→S3	S1→S4
DCP2	S2→SP	?	S2→SP	S2→S3	S2→S4
DCP3	S4→SP	S4→SP	?	S4→S3	0
RCS1	0	0	0	?	SP→S4
RCS2	0	0	0	SP→S3	?

Tableau 27 : Les valeurs de $z_{j,j'}$

La prise en compte de transports à vide, nous permet de modéliser les activités de transports un peu différemment de celle présentée précédemment.

Il faut noter que nous étudions l'ordonnancement de deux types d'activités de transports pour un seul type de produits. Lors du chargement ou du déchargement des véhicules sur le site de produc-

tion, nous pouvons remarquer que les quais sont des ressources critiques. Le nombre de quais aux sites de consommation est supposé illimité.

6.2. Modèle mathématique

Nous avons ajouté des contraintes afin de gérer les transports à vide entre deux activités de transports successives. L'ensemble des contraintes permettant de gérer les transports à vide entre deux activités de transport est obtenu à partir des contraintes du Flow Shop Hybride avec temps de montage dépendant de la séquence.

Les données sont définies dans le Tableau 28.

Données	Notation
Nombre d'activités	N
Borne supérieure du makespan en nombre de période	T
Quantité de ressources de type k requise par l'étape e de l'activité j	$r_{j,k,e}$
Nombre d'étape pour l'activité j	$E_j = 2$, pour $j = 1, N$
Nombre de type de ressources	$K = 4$
Nombre de véhicules disponibles	R_1
Nombre de chauffeurs disponibles	R_2
Nombre de quais de chargement disponibles sur le site de production	R_3
Nombre de quais de déchargement disponibles sur le site de production	R_4
Durée de la 1 ^{ère} étape de l'activité j	$p_{j,1}$
Durée de la 2 ^{ème} étape de l'activité j	$p_{j,2}$
Date de fin au plus tôt de l'étape e de l'activité j	$EF_{j,e}$
Date de fin au plus tard de l'étape e de l'activité j	$LF_{j,e}$
Délai entre la fin de l'activité j et le début de l'activité j'	$z_{j,j'}$
Nombre d'activités de transport de contenants sales	NS
Nombre d'activités de transport de contenants propres	NP
Date de début de mise à disposition des contenants propres	d_1

Tableau 28 : Notation des données communes avec les modélisations précédentes

Les variables sont :

$$\begin{aligned}
 y_{j,j',s} &= 1, \text{ si l'activité } j \text{ est affectée au chauffeur } s \text{ juste après l'activité } j', 0 \text{ sinon} \\
 &\text{Pour } j = 1, N; j' = 0, N; s = 1, R_2; j \neq j' \\
 x_{j,e,t} &= 1, \text{ si l'étape } e \text{ de l'activité } j \text{ se termine à la période } t, 0 \text{ sinon} \\
 &\text{Pour } j = 1, N; e = 1, E_j; t = 1, T \\
 L_j &\text{ Retard de l'activité } j
 \end{aligned}$$

L'objectif de ce problème est de minimiser la somme des retards :

$$\min \sum_{j=1}^N L_j$$

Tout en respectant les contraintes suivantes :

$$\sum_{t=EF_{j,e}}^T x_{j,e,t} = 1, \text{ pour } j = 1, N; e = 1, E_j \quad 2.26$$

La contrainte 2.26 assure que chaque étape de chaque activité se termine dans une seule période.

$$EF_{j,e} \leq \sum_{t=EF_{j,e}}^T t \times x_{j,e,t}, \text{ pour } j = 1, N; e = 1, E_j - 1 \quad 2.27$$

Par cette contrainte, nous vérifions que l'étape e d'une activité j ne se termine pas avant sa date de fin au plus tôt.

$$\sum_{t=EF_{j,1}}^T t \times x_{j,1,t} + p_{j,2} \leq \sum_{t=EF_{j,2}}^T t \times x_{j,2,t}, \text{ pour } j = 1, N \quad 2.28$$

La contrainte de précédence entre les étapes est vérifiée par la contrainte 2.28. L'étape e précède l'étape $e + 1$, ce qui signifie que l'intervalle de temps qui sépare la fin de l'étape e de l'activité j et la fin de l'étape $e + 1$ de la même activité j est au moins supérieure ou égale à la durée de l'étape $e + 1$.

$$\sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^2 \sum_{t_1=t}^{t+p_{j,e}-1} x_{j,e,t_1} + \sum_{j=1}^N \left(\sum_{t_1=t}^T (x_{j,2,t_1} - x_{j,1,t_1}) - \sum_{t_1=t}^{t+p_{j,2}-1} x_{j,2,t_1} \right) \leq R_1 \quad 2.29$$

pour $t = 1, T$

La contrainte 2.10, concernant le respect du nombre de véhicules disponibles, n'est pas modifiée pour notre problème.

$$\sum_{j=1}^{NP} \sum_{t_1=t}^{t+p_{j,2}-1} x_{j,2,t_1} + \sum_{j=NP+1}^{NP+NS} \sum_{t_1=t}^{t+p_{j,1}-1} x_{j,1,t_1} \leq R_2, \text{ pour } t = 1, T \quad 2.30$$

Dans le cas des transports de contenant propre, le chauffeur ne participe qu'à la deuxième étape. Donc, $r_{j,2,1} = 0$ et $r_{j,2,2} = 1$ pour $j = 1, NP$. Nous devons également prendre en compte le cas de transport de contenants sales : le chauffeur ne participe qu'à la première étape, $r_{j,2,1} = 1$ et $r_{j,2,2} = 0$ pour $j = NP + 1, NP + NS$. La contrainte 2.30 prend en compte l'utilisation des chauffeurs.

Par contre, les contraintes 2.11 sur le respect du nombre de chauffeurs sont modifiées en fonction du type d'activité de transport considérée. Les contraintes 2.12 et 2.17 sur le respect du nombre de quais de chargement et de déchargement sur le site de production sont reprises telles qu'elles sont présentées précédemment.

$$\sum_{j=1}^{NP} \sum_{t_1=t}^{t+p_{j,1}-1} x_{j,1,t_1} \leq R_3, \text{ pour tout } t = 1, T \quad 2.31$$

Nous obtenons une contrainte du respect du nombre de quais décomposée en deux. En effet, lors du chargement des contenants propres, le quai de chargement du site de production est nécessaire pour la 1^{ère} étape.

$$\sum_{j=NP+1}^{NP+NS} \sum_{t_1=t}^{t+p_{j,2}-1} x_{j,2,t_1} \leq R_4, \text{ pour } t = 1, T \quad 2.32$$

Dans le cas des activités de transport de contenant sale, Le chauffeur ne participe pas au déchargement (étape 2), ainsi, les valeurs de $r_{j,k,e}$ sont $r_{j,4,1} = 0$ et $r_{j,4,2} = 1$

$$\sum_{t=1}^{d_1} \sum_{j=1}^{NP} x_{j,1,t} = 0 \quad 2.33$$

Maintenant, il nous faut prendre en compte la non-mise à disposition des armoires propres avant la date de début d_1 de la première production.

$$\sum_{t=d_1}^{pk+d_1} \sum_{j=1}^{NP} x_{j,1,t} \leq k \times nd, \text{ pour } k = 1, \left\lfloor \frac{NP}{nd} \right\rfloor \quad 2.34$$

Nous définissons le retard de la manière suivante :

$$L_j \geq \sum_{t=1}^T t \times x_{j,2,t} - LF_{j,2}, \text{ pour } j = 1, N \quad 2.35$$

$$\sum_{t=0}^T t \times x_{j,1,t} \geq \sum_{t=0}^T t \times x_{j',2,t} + p_{j,1} + \left[\left(\sum_{s=1}^{R_2} y_{j,j',s} \right) - 1 \right] \times M + z_{j,j'}, \quad 2.36$$

pour tout $j = 1, N, j' = 0, N$

$$\sum_{j'=0}^N \sum_{s=1}^{R_2} y_{j,j',s} = 1, \text{ pour } j = 1, N \quad 2.37$$

$$\sum_{j'=1}^N y_{0,j',s} \leq 1, \text{ pour } s = 1, R_2 \quad 2.38$$

$$\left(\sum_{j=0}^N y_{j,j',s} \right) - \left(\sum_{j \neq j'}^N y_{j,j',s} \right) = 0, \text{ pour } j' = 1, s = 1, R_2 \quad 2.39$$

$$y_{j,j',s} \in \{0,1\}, \text{ pour } j = 1, N, j' = 1, N \text{ et } s = 1, R_2 \quad 2.40$$

$$L_j \geq 0, \text{ pour } j = 1, N \quad 2.41$$

Les contraintes 2.24 à 2.33 correspondent à la modélisation des activités de distribution des contenants propres et de retour des contenants sales présentée dans la partie précédente. Les contraintes de 2.34 à 2.39 correspondent aux activités de transports à vide.

6.3. Mise en œuvre et résultats

Nous reprenons l'instance étudiée dans la partie 5.3 concernant la livraison des repas, soit 25 activités de transports au total (13 DCP et 12 RCS). L'organisation de livraison des repas le matin déterminée précédemment ayant donné satisfaction aux responsables, nous nous focalisons sur les activités de l'après-midi soit 7 DCP et 6 RCS. Nous présentons les données pour chacune des activités dans le Tableau 29. Pour chaque activité, nous avons retiré la durée du transport à vide.

j	A'		B'		C'		D'		E'		F'		G'	
Site	HE		HE		GM		GM		GM		GM		HN	
e	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
$p_{j,e}$	0h10	0h30	0h10	0h30	0h10	0h20	0h10	0h20	0h10	0h20	0h10	0h20	0h10	0h50
EF _{j,e}	14h40	15h25	14h40	15h25	14h40	15h10	14h40	15h10	14h40	15h10	14h40	15h10	14h40	15h30
LF _{j,e}	16h40	17h25	16h40	17h25	16h50	17h20	16h50	17h20	16h50	17h20	16h50	17h20	16h40	17h30

Tableau 29 : Données pour les DCP

j	H'		I'		J'		K'		L'		M'	
Site	HE		HE		GM		GM		GM		GM	
e	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
$p_{j,e}$	0h20	0h10	0h20	0h10	0h20	0h10	0h20	0h10	0h20	0h10	0h20	0h10
$EF_{j,e}$	15h15	15h25	15h15	15h25	15h	15h10	15h	15h10	15h	15h10	15h	15h10
$LF_{j,e}$	15h50	16h	15h50	16h	15h50	16h	15h50	16h	15h50	16h	15h50	16h

Tableau 29 : Données pour les RCS

Le Tableau 30 donne pour un nombre variable de véhicules et de chauffeurs, le retard obtenu ainsi que la durée d'exécution du modèle.

Ressources		Retard (en minutes)		Durée exécution
Véhicules	Chauffeurs	DCP	RCS	
5	4	0	0	<1s
4	4	0	5	5s
4	3	0	10	6h
3	3	0	30	24h

Tableau 30 : Résultats pour deux types d'activité de transport pour une mise à disposition des contenants à 9h le matin et à 15h l'après-midi

La solution sélectionnée pour les transports du matin comporte 2 chauffeurs et 3 véhicules. Compte tenu du coût d'investissement, les responsables du CHU ont retenu la solution du Tableau 30 comportant 3 véhicules et 3 chauffeurs, car les 30 minutes de retard concernent 1 RCS (encadrée dans la Figure 32) et ce retard, après négociation, peut être absorbé par l'aire de nettoyage.

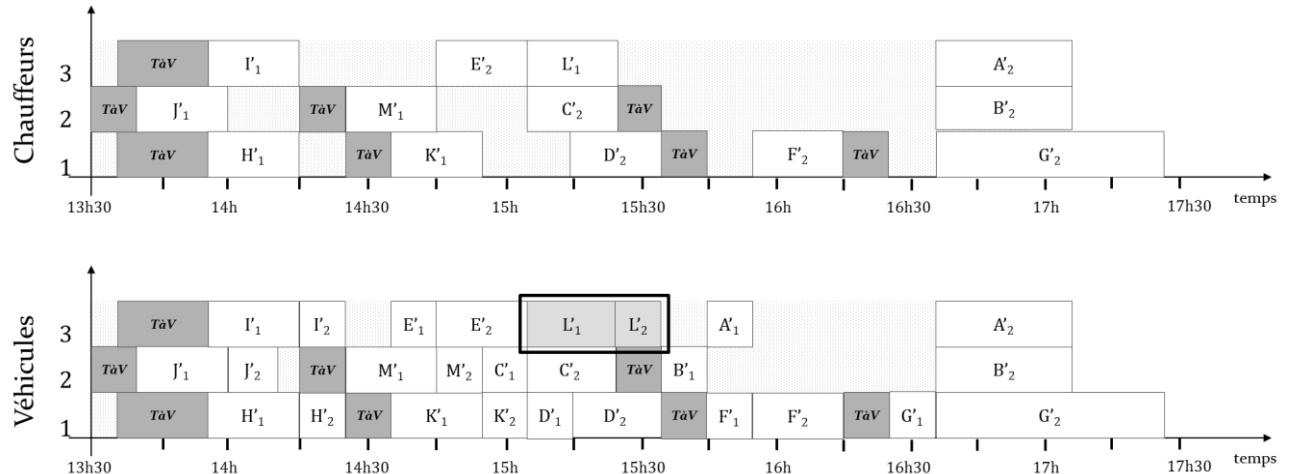


Figure 32 : Représentation des résultats obtenus pour les activités de l'après-midi avec 3 chauffeurs et 3 véhicules

Pour conclure sur cette expérimentation, il a été décidé d'investir dans 3 véhicules frigorifiques. Le nombre de chauffeurs n'a pas pu être arrêté car le problème du respect du temps de travail s'est posé.

7. Conclusion

Nous avons décrit un problème de transport de produits dans lequel les activités de transport sont décomposées en plusieurs étapes afin de prendre en compte l'utilisation des ressources : les chauffeurs ne participent pas au chargement et au déchargement sur le site de production, les quais de chargement et de déchargement sont en nombre limité.

L'état de l'art sur les problèmes d'organisation des flux dans un environnement hospitalier nous a montré que les études traitent soit des transports de patients, soit des transports de produits tels que les dossiers des patients, les produits pharmaceutiques, le matériel médical ou encore les produits issus de l'activité médicale. Les problèmes sont modélisés comme des problèmes de transports (VRP, PDP, DARP,...) et la demande de transport est soit statique (connue à l'avance), soit dynamique (des demandes peuvent arriver de manière imprévue). Malheureusement, la majeure partie des références que nous avons étudiées ne prennent en compte qu'un seul type de ressources.

Etant donné la difficulté concernant la gestion des ressources, nous avons proposé de modéliser notre problème pour l'organisation des transports d'un seul type de produit avec un RCPSP avec profil de demande en ressource variable auquel nous avons ajouté les dates de mise à disposition des contenants. Les résultats obtenus ont permis de montrer que nous devons travailler en prenant en compte les deux types d'activités de transport simultanément lors de la résolution. Pour cela nous avons alors ajouté la gestion des transports à vide en faisant un parallèle entre les temps de montage dépendant de la séquence et les temps de transports à vide..

Les résultats obtenus nous ont permis de mettre en évidence que le nombre d'activités impactait très fortement la vitesse d'exécution du programme. Ces résultats ont été soumis à validation des responsables des différents services. Lorsque nous avons présenté les résultats aux responsables, très rapidement, de nouvelles contraintes à prendre en compte sont apparues :

- Le nombre de véhicules utilisant les quais au niveau des sites de consommation est vite devenu insuffisant à certaines heures de la journée, par conséquent, le nombre de quais sur les sites de consommation doit être pris en compte ;
- le nombre limité de contenants ne permet pas de faire un enchaînement d'activité du type distribution de contenant propre et retour de contenant sale ;
- la date d'arrivée des contenants sales ne permet pas de prendre en compte la phase de nettoyage : une seule aire de nettoyage permet de laver l'équivalent d'un chargement de véhicule en 40 minutes.

Chapitre 3 Transports de plusieurs types de produits

1. Introduction

Dans ce chapitre, le problème consiste à organiser le transport de plusieurs types de produits. Pour chaque type de produit, un site de production fournit les produits nécessaires aux sites de consommations avec leur propre type de contenant et des véhicules adaptés à leur transport. La diversité des ressources nécessaires pour la réalisation des activités de transport et le nombre important d'activités à effectuer entraînent une remise en question de la résolution envisagée dans le Chapitre 2.

Le périmètre de notre problème ne se borne pas uniquement aux chauffeurs, aux véhicules et aux quais des sites de production comme dans le chapitre précédent, mais doit également prendre en compte un certain nombre de ressources supplémentaires. Le nombre de contenants pour le transport des produits étant limité, ceux-ci peuvent être utilisés successivement pour différentes activités de transport dans une même journée. Par conséquent, les lignes de production et les aires de nettoyage sont prises en compte, ainsi que les quais de chargement et déchargement aux sites de consommation. Un dépôt où se situent les véhicules et les chauffeurs est également pris en compte. Des caractéristiques complémentaires concernant les chauffeurs sont à prendre en compte :

- Les chauffeurs peuvent soit réaliser les activités de transport pour un seul type de produit, ce sont des chauffeurs dédiés, soit réaliser des transports de différents types de produits, ce sont des chauffeurs dits polyvalents ;
- Les chauffeurs sont soumis à des planning de travail qui correspondent soit à un mi-temps, soit à un plein temps.

Nous commencerons ce chapitre par la description du modèle de connaissance concernant l'organisation des activités de transport de plusieurs types de produits entre les différents sites. Lors de notre étude de la littérature nous avons sélectionné un problème en particulier : le Pickup and Delivery Problem (PDP). Nous avons alors vu qu'il existait de nombreuses extensions à ce problème comme l'ajout des contraintes de fenêtre de temps ou encore la prise en compte de transport de charges complètes (un chargement remplit entièrement le véhicule). Nous avons identifié deux difficultés : l'évaluation des critères de performance (nombre d'activités non réalisées, retards et heures supplémentaires) et l'affectation et l'ordonnancement des activités de transport entre les chauffeurs. Nous proposons alors un outil pour résoudre le problème à l'aide d'un couplage métaheuristique – modèle de simulation. À l'aide de cet outil, nous proposons des solutions d'organisation pour les responsables du CHU. Nous avons testé notre approche avec les instances proposées par le CHU qui reprend les principales phases de transformations de l'hôpital. Le nombre d'activités de transport à prendre en compte varie de 12 à 70.

2. Modèle de connaissance

Le problème consiste à organiser le transport de plusieurs types de produit (linge, repas, médicaments). Un type de produit est placé dans un contenant spécifique. Le nombre de contenants dispo-

nibles 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. Les plateaux repas sont préparés par l'Unité Centrale de Production Alimentaire (UCPA), distribués aux unités de soin puis, après consommation, ramenés à l'UCPA pour nettoyage. Le linge est nettoyé par la blanchisserie, livré aux sites de consommation 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. Comme précédemment, nous distinguerons ces deux activités 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. Un planning de travail correspond soit à :

- Un 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 ;
- Un 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** (véhicule frigorifique, petit frigorifique, standard). Un type de produit 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 véhicule frigorifique ou un petit véhicule frigorifique, un véhicule standard peut transporter le linge ou les médicaments).

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 est soumis à un planning connu d'ouverture et de fermeture identique quel que soit le jour. Un quai, une aire de nettoyage et une ligne de production sont des ressources statiques. Nous considérons un site particulier le **dépôt** dans lequel sont placées les ressources humaines et les véhicules lorsqu'ils ne sont pas utilisés. Ce dépôt est supposé de capacité illimitée.

Une **route** relie deux sites. Le temps de parcours entre deux sites est évalué selon une durée de parcours à l'aller et une durée de parcours au retour. En effet, de nombreux sens uniques ne permettent pas de prendre les mêmes trajets à l'aller et au retour.

Les **ressources matérielles** mobiles se déplaçant entre les sites, sont :

- Les **contenants** : un contenant sert à acheminer des produits. Il sera identifié selon un numéro et est caractérisé par un **type** (exemple : armoire, chariot, panier, roll) ;
- Les **véhicules** : un véhicule est identifié selon un numéro de matricule. Il assure les activités de transport (transport de contenant et transport à vide). Un véhicule est caractérisé par un **type** (exemple : véhicule frigorifique, véhicule isotherme de grand gabarit, véhicule isotherme de petit gabarit, véhicule « normal », véhicule de petit gabarit) ;

- Les **chauffeurs** : un chauffeur est identifié selon un numéro, et est caractérisé par un planning. Un chauffeur peut conduire n'importe quel véhicule et peut changer plusieurs fois de véhicule lors d'une journée de travail. Il se déplace avec un véhicule entre les différents sites.

Nous distinguons deux activités de transports : les activités de distribution de contenant propre et les activités de retour de contenant sale. Chaque **activité de transport** est caractérisée par un nombre d'étapes et pour chaque étape sa durée, les ressources de différents types nécessaires et éventuellement une date de fin au plus tard souhaitée ainsi qu'une date de début au plus tôt imposée sont précisées. Une activité de transport est caractérisée par un site-origine et un site-destination.

La « distribution de contenant propre » est composée de 5 étapes, qui nécessitent un contenant et ont une durée connue (Figure 33) :

- Etape 1. Le remplissage du contenant qui nécessite une ligne de production ;
- Etape 2. Le chargement du contenant dans le véhicule qui nécessite un chauffeur, un quai de chargement sur le site de production ;
- Etape 3. Le transport du contenant du site de production au site de consommation qui nécessite le chauffeur et le véhicule de l'étape 2 ;
- Etape 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 ;
- Etape 5. L'acheminement des contenants aux unités de soins et la consommation du contenant sur le site de consommation.

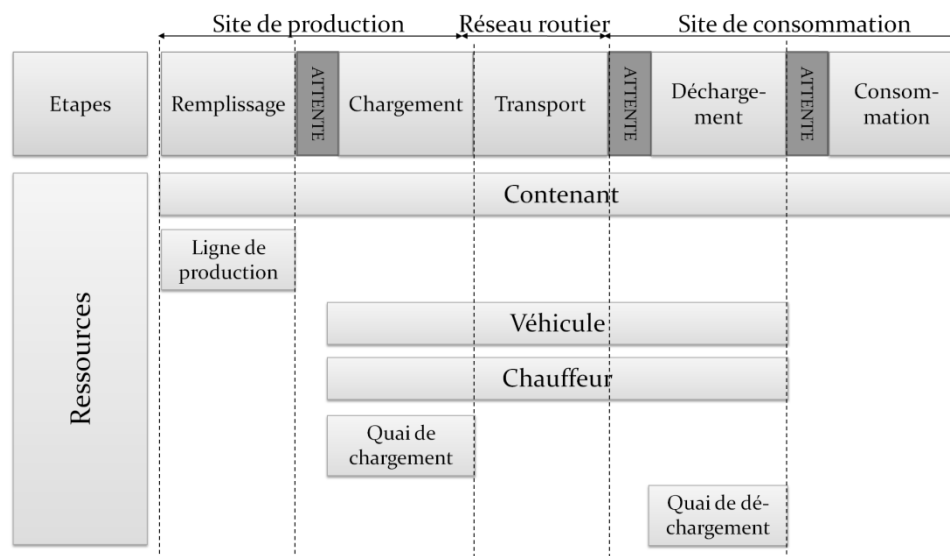


Figure 33 : activité de distribution de contenant propre

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

- Etape 1. L'acheminement du contenant des unités de soins au quai de chargement du site de consommation ;
- Etape 2. Le chargement du contenant dans le véhicule qui nécessite un chauffeur, un quai de chargement sur le site de consommation ;
- Etape 3. Le transport du contenant du site de consommation au site de production qui nécessite le chauffeur et le véhicule de l'étape 2 ;
- Etape 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 ;
- Etape 5. Le nettoyage du contenant sur le site de production qui utilise une aire de nettoyage.

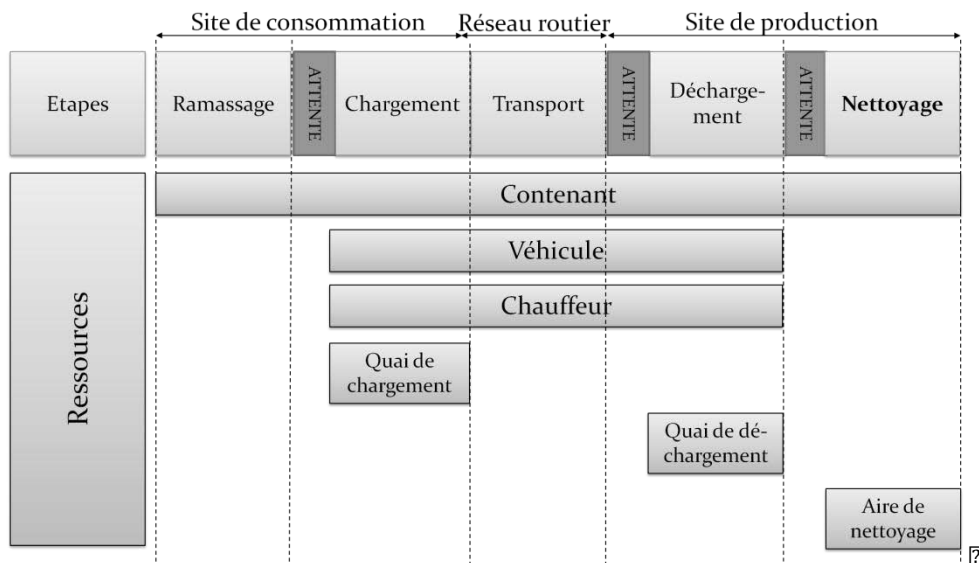


Figure 34 : activité de retour de contenant sale

Les temps d'attente, indiqués en gris foncé dans la Figure 33 et la Figure 34, sont imposés dès que l'une des ressources nécessaires à la réalisation de l'étape suivante est indisponible. Nous pouvons noter que la consommation des contenants propres n'exige pas de ressources complémentaires. La consommation de certains contenants se fait uniquement à des dates fixées, entraînant alors une attente. Prenons l'exemple des repas : ils ne sont consommés qu'à 12h et cela même s'ils sont livrés bien avant. Cette attente a un impact important sur la suite pour les activités de retour des contenants sales. Les contenants sales issus de cette activité ne sont disponibles qu'après la prise des repas par les patients.

Dans la suite, nous considérons N activités à réaliser sur une journée. 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 : le « retour du contenants sales » ne peut avoir lieu qu'après la « distribution d'un contenant propre ».

En raison de la présence du dépôt, des transports à vide doivent être réalisés dans les cas indiqués dans le Tableau 31 :

Représentation	Transport à vide
	Entre deux activités Entre deux activités si la destination de la première activité est différente de l'origine de la seconde,
	Départ du dépôt 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,
	Retour au dépôt 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,
	Changement de véhicule Entre deux activités de transport 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.

Tableau 31 : Règle de gestion des transports à vide dans notre problème

L'objectif est l'organisation des activités de transport en veillant à la réalisation de toutes les activités dans une journée c'est-à-dire répartir les activités entre un nombre donné de chauffeurs dont le planning est connu et pour chaque chauffeur ordonnancer des activités dans l'objectif de minimiser les retards et les heures supplémentaires.

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 ;
- Chaque chauffeur a son planning de travail et chaque ligne de production et aire de nettoyage est soumis à un planning d'ouverture ;
- Pour chaque type de ressource, le nombre de ressources utilisées doit être inférieur ou égal au nombre de ressources disponibles à un instant donné.

Nous travaillons avec l'hypothèse que le nombre de contenants est limité pour chaque type (chariots repas, navettes repas, armoires de linge, rolls de médicaments), pour un nombre donné d'activité, de chauffeur. Les chauffeurs travailleront selon un planning donné, c'est-à-dire avec une date de début de travail et de début de pause et une date de fin de pause et de travail.

3. Etat de l'art

En général, un problème de transport consiste à organiser le passage d'un véhicule chez des clients. Les problèmes de transport sont très variés dans la littérature et chacun prend en compte diverses contraintes et hypothèses. Les spécificités de chaque problème sont donc directement liées aux contraintes qui sont prises en compte. Les contraintes les plus fréquemment énoncées dans la littérature sont :

- La contrainte de capacité permet de vérifier que la capacité du ou des véhicule(s) est respectée en tout point de la tournée ;
- La contrainte d'unicité de service impose que chaque activité de transport est réalisée une et une seule fois ;
- La contrainte de durée maximum de tournée permet de limiter la durée d'une tournée selon un temps donné ;
- Afin d'organiser le passage des véhicules chez les clients, deux contraintes doivent être prises en compte :
 - La contrainte de pairing prend en compte que le véhicule ayant assuré le service à l'origine doit être le même que celui qui assure le service à destination ;
 - La contrainte de précédence assure que le véhicule réalisant le service à destination a bien assuré le service à l'origine avant ;
- La contrainte de durée maximum de trajet vérifie que le temps de séjour d'un client (en général un patient) dans un véhicule n'excède pas une certaine durée ;
- La contrainte de fenêtre de temps correspond à la date de début au plus tôt et la date de fin au plus tard d'un service à effectuer à l'origine et/ou à la destination ;
- La contrainte de charge complète exige que tout chargement pris à l'origine doit être directement transporté à sa destination.

Dans le Tableau 32, ces problèmes de transport sont classés en fonction des contraintes qu'ils prennent en compte. Nous avons identifié 4 types de problèmes de transport qui nous ont semblé proches de notre problème : le Pickup and Delivery Problem (PDP), le Pickup and Delivery Problem with Time Windows (PDP-TW), le Dial A Ride Problem (DARP) et le Pickup and Delivery Problem of Full truckLoads under Time Windows (PDP-TW-FL).

Contraintes	PDP	PDP-TW	DARP	PDP-TW-FL
Contrainte de capacité	x	x	x	x
Contrainte d'unicité de service	x	x	x	x
Contrainte de durée maximum de tournée	x	x	x	x
Contrainte de pairing	x	x	x	x
Contrainte de précédence	x	x	x	x
Contrainte de durée maximum de trajet			x	
Contrainte de fenêtre de temps		x	x	x
Contrainte de charge complète				x

Tableau 32 : Contraintes prises en compte dans les différents problèmes de la littérature

Nous allons tout d'abord nous intéresser au PDP avant de nous intéresser aux extensions telles que le PDP-TW, le DARP et le PDP-TW-FL.

3.1. Le Pickup and Delivery Problem (PDP)

Le Pickup and Delivery Problem est un problème de transport qui consiste à ramasser des marchandises à un point de collecte (origine), les transporter entre une origine et un point de livraison (destination) et de les décharger à leur destination. Le fait de charger la marchandise et l'action de la décharger constituent un service. Ce service nécessite une durée qui peut être prise en compte. La marchandise déplacée correspond à une demande, ou activité de transport, définie par une origine, une destination et un volume à déplacer.

La Figure 35 présente un exemple de données pour un PDP.

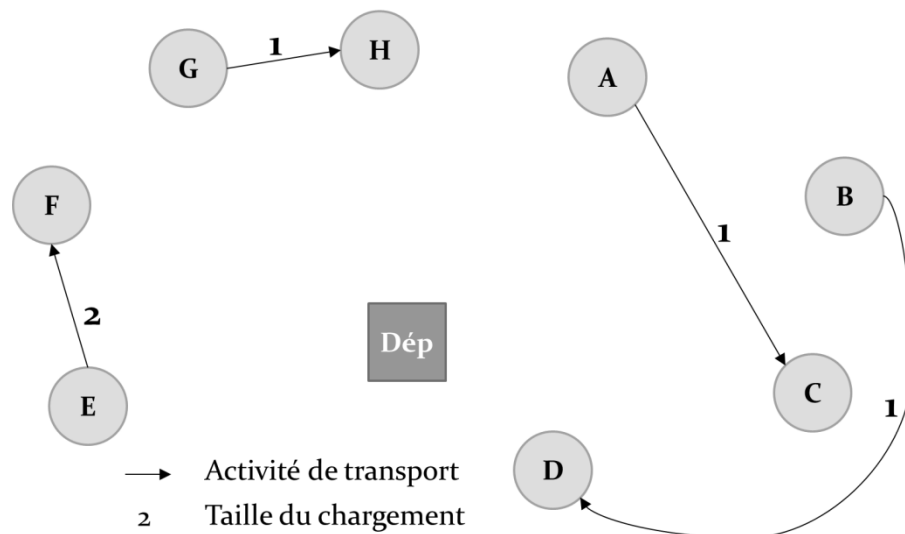


Figure 35 : Exemple de données pour un PDP

Dans cet exemple, 4 activités de transport doivent être effectuées. L'objectif est de réaliser l'ensemble des activités de transport à l'aide d'une flotte de véhicules. Pour réaliser l'ensemble des activités de transport de cet exemple, nous disposons, de deux véhicules de capacité identique $Q = 2$, qui partent du dépôt et doivent y revenir.

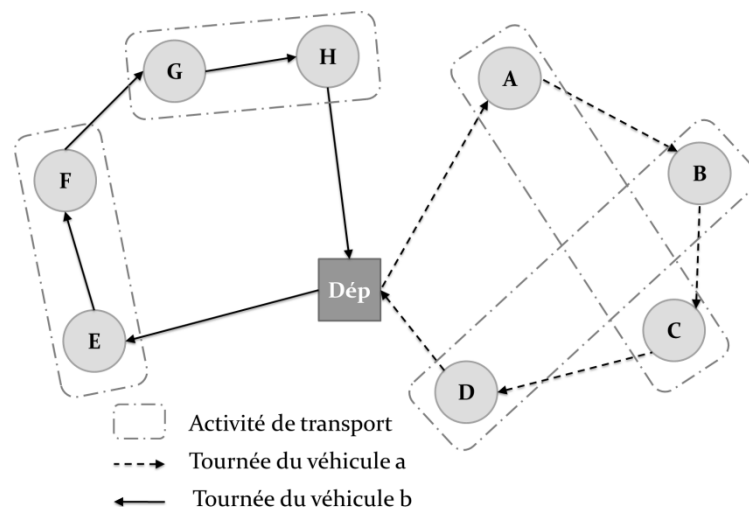


Figure 36 : Exemple de tournées pour le PDP

Selon la Figure 36, le véhicule *a* réalise une tournée passant par les points E, F, G et H. Le véhicule *b* passe successivement par les points A, B, C et D. Etant donnée la capacité des véhicules, la tournée du véhicule *b* permet d'enchaîner deux chargements successifs avant les déchargements, contrairement à la tournée du véhicule *a*. L'évolution de la charge des véhicules est présentée dans la Figure 37.

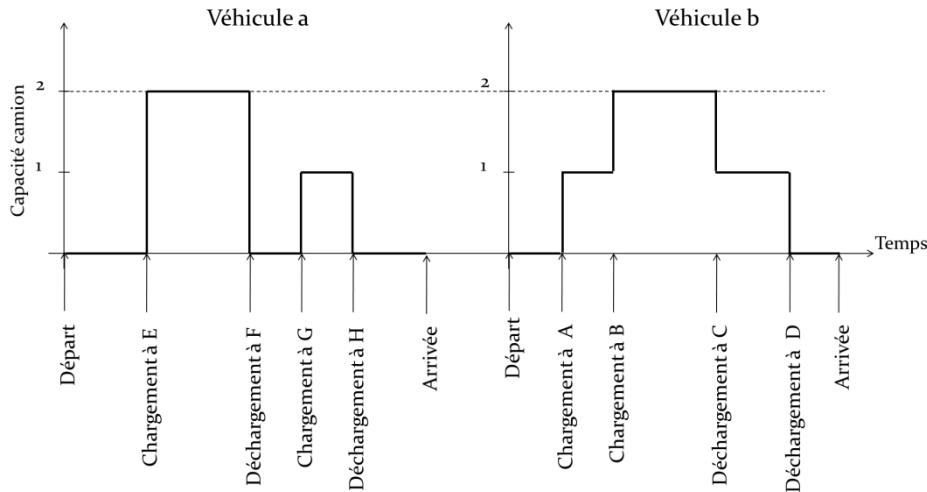


Figure 37 : Diagramme de charge des véhicules *a* et *b* pour l'exemple du PDP

(Salvesberg & Sol, 1995) proposent une formulation mathématique pour le problème du PDP. Les données de ce problème sont présentées dans le Tableau 33. Le nœud 0 désigne le dépôt.

Données	Notation
Nombre d'activités de transports	N
Nœud d'origine de l'activité $i \in N$	N_i^+
Nœud de destination de l'activité $i \in N$	N_i^-
Ensemble des nœuds de collectes	$N^+ = \bigcup_{i \in N} N_i^+$
Ensemble des nœuds de livraisons	$N^- = \bigcup_{i \in N} N_i^-$
Ensembles des nœuds	$V = N^+ \cup N^-$
Taille de la charge de l'activité $i \in N$	q_i
Ensemble des véhicules	M
Capacité du véhicule k	Q_k
Position de départ du véhicule k	k^+
Position de retour du véhicule k	k^-
Ensemble des positions de départ	$M^+ = \{k^+ k \in M\}$
Ensemble des positions d'arrivée	$M^- = \{k^- k \in M\}$
Ensemble des positions	$W = M^+ \cup M^-$
Distance entre les nœuds i et j , i et $j \in V \cup W$	$d_{i,j}$
Durée de transport entre les nœuds i et j , i et $j \in V \cup W$	$t_{i,j}$
Coût de transport entre les nœuds i et j , i et $j \in V \cup W$	$c_{i,j}$

Tableau 33 : Données du PDP

La taille de la charge est positive pour les sommets de collectes et négatives pour les sommets de livraisons. Chaque charge peut être subdivisée de la façon suivante : $\bar{q}_i = \sum_{j \in N_i^+} q_j = -\sum_{j \in N_i^-} q_j$.

Les variables du problème sont :

- $z_i^k = 1$ si l'activité $i \in N$ est affectée au véhicule $k \in M$
 $= 0$ sinon
 $x_{i,j}^k = 1$, si le véhicule $k \in M$ réalise le trajet entre les nœuds i et j , i et $j \in (V \times V) \cup \{(k^+, j) | j \in V\} \cup \{(j, k^-) | j \in V\}$,
 $= 0$ sinon
 D_i Date de départ du nœud $i \in V \cup W$
 y_j Charge du véhicule arrivant au nœud $i \in V \cup W$

L'objectif est de minimiser les coûts des différentes tournées, tout en respectant les contraintes suivantes.

$$\sum_{k \in M} z_i^k = 1, \text{ pour } i \in N \quad 3.42$$

Chaque activité est affectée à un seul véhicule, selon la contrainte 3.42.

$$\sum_{j \in V \cup W} x_{i,j}^k = \sum_{j \in V \cup W} x_{j,i}^k = z_i^k, \text{ pour } i \in N, l \in N_i^+ \cup N_i^- \text{ et } k \in M \quad 3.43$$

La contrainte 3.43 assure que si un véhicule est affecté à l'activité i , alors il dessert son origine et sa destination.

$$\sum_{j \in V \cup \{k^-\}} x_{k^+,j}^k = 1, \text{ pour } k \in M \quad 3.44$$

Chaque véhicule part de son dépôt de départ, selon la contrainte 3.44.

$$\sum_{j \in V \cup \{k^+\}} x_{j,k^-}^k = 1, \text{ pour } k \in M \quad 3.45$$

La contrainte 3.45 impose que chaque véhicule retourne à son dépôt.

$$D_{k^+} = 0, \text{ pour } k \in M \quad 3.46$$

$$D_p \leq D_q, \text{ pour } i \in N, p \in N_i^+, q \in N_i^- \quad 3.47$$

La contrainte 3.47 assure que pour chaque activité, la date de passage à l'origine est inférieure ou égale à la date de passage à la destination.

$$x_{i,j}^k = 1 \Rightarrow D_i + t_{i,j} \leq D_j, \text{ pour } i, j \in V \cup W, k \in M \quad 3.48$$

Les temps de transport entre les nœuds i et j sont pris en compte, selon la contrainte 3.48.

$$y_{k^+} = 0, \text{ pour } k \in M \quad 3.49$$

$$y_i \leq \sum_{k \in M} Q_k \times z_i^k, \text{ pour } i \in N, l \in N_i^+ \cup N_i^- \quad 3.50$$

La contrainte 3.50 vérifie que si un véhicule k est affecté à l'activité i , alors la charge au départ et à destination de i est inférieure ou égale à la charge.

$$x_{i,j}^k = 1 \Rightarrow y_i + q_i = y_j, \text{ pour } i, j \in V \cup W, k \in M \quad 3.51$$

Si le véhicule réalise le trajet entre i et j , la charge du véhicule arrivant au nœud j est égale à la somme de la charge du véhicule partant du nœud i et la quantité chargée au nœud i , selon la contrainte 3.51.

$$x_{i,j}^k \in \{0,1\}, \text{ pour } i, j \in V \cup W, k \in M \quad 3.52$$

$$z_i^k \in \{0,1\}, \text{ pour } i \in N, k \in M \quad 3.53$$

$$D_i \geq 0, \text{ pour } i \in V \cup W \quad 3.54$$

$$y_i \geq 0, \text{ pour } i \in V \cup W \quad 3.55$$

Les variables x et z sont binaires et les variables D et y sont positives ou nulles, selon les contraintes 3.52, 3.53, 3.54 et 3.55.

3.2. Le PDP-TW et le DARP Statique

Le Pickup and Delivery Problem with Time Windows (PDP-TW) est une extension du PDP. Dans le cas du PDP-TW, les services à réaliser à chaque nœud sont soumis à des contraintes de dates. Par conséquent, chaque nœud i est caractérisé par :

- une fenêtre de temps $[e_i, l_i]$, où e_i est la borne inférieure et l_i la borne supérieure de la fenêtre temporelle du sommet i , pendant laquelle le chargement (ou déchargement) est autorisé ;
- la durée de service au nœud i , notée s_i .

Nous noterons la variable A_i la date d'arrivée du véhicule au nœud i . Il existe deux types de fenêtres de temps :

- la contrainte de fenêtre de temps dite « fermée » (Figure 38) correspond au fait que les services aux nœuds sont obligatoirement réalisés entre la date au plus tôt et la date au plus tard. Si le véhicule arrive avant la date e_i , le véhicule attend que la date e_i soit atteinte avant de pouvoir débuter le chargement ou le déchargement ;

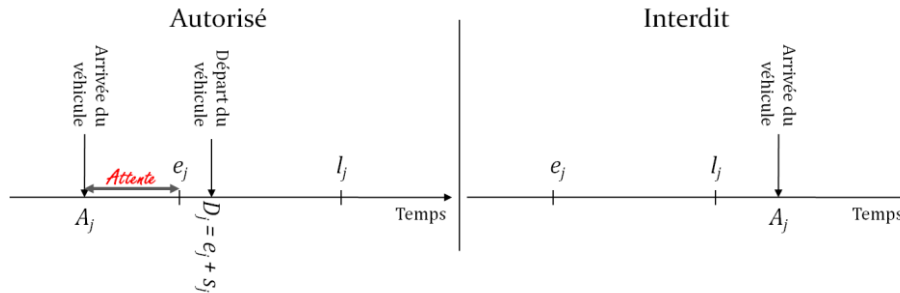


Figure 38 : Fenêtre de temps dite « fermée »

Le modèle mathématique est alors complété de la manière suivante :

$$x_{i,j}^k = 1 \Rightarrow D_i = \max(e_i, A_i) + s_i, \text{ pour tout } i, j \in V, k \in M \quad 3.56$$

$$x_{i,j}^k = 1 \Rightarrow D_i \leq l_i, \text{ pour tout } i, j \in V, k \in M \quad 3.57$$

- la contrainte de fenêtre de temps dite « semi-ouverte » (Figure 39), lorsque les retards sont autorisés :
 - cas 1 : Si le véhicule arrive avant la date e_i , le véhicule attend que la date e_i soit atteinte avant de pouvoir débuter le chargement ou le déchargement ;
 - cas 2 : si le véhicule arrive après la date l_i , le service est tout de même réalisé, mais il y aura un retard.

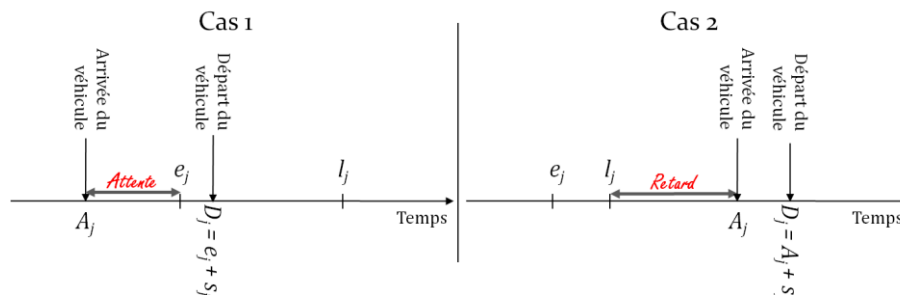


Figure 39 : Fenêtre de temps dite « semi-ouverte »

Le modèle mathématique est alors complété de la manière suivante :

$$x_{i,j}^k = 1 \Rightarrow D_i = \max(e_i, A_i) + s_i, \text{ pour tout } i, j \in V, k \in M \quad 3.58$$

$$x_{i,j}^k = 1 \Rightarrow A_i \leq l_i, \text{ pour tout } i, j \in V, k \in K \quad 3.59$$

Pour évaluer le retard au nœud i , nous introduisons une variable L_i . Ce retard est calculé de la manière suivante :

$$L_i = \sum_{i \in V} \max(D_i - l_i; 0)$$

Les contraintes de fenêtre de temps peuvent s'appliquer aux sites (origine et/ou destination), comme nous venons de le voir, mais également aux chauffeurs ou aux durées de parcours des personnes :

- Durée maximum de trajet : cette contrainte est liée à la durée totale maximum de trajet pour un client ;
- Durée maximum de conduite : cette contrainte s'applique soit au dépôt (lorsque tous les chauffeurs travaillent selon les mêmes horaires, le dépôt est soumis à des horaires d'ouverture et de fermeture) soit aux véhicules (étant donné que les chauffeurs ne sont pas distingués des véhicules) ;
- Disponibilité des véhicules : cette contrainte est une fenêtre de temps liée aux véhicules.

Il est à noter qu'il existe une variante du PDP-TW, le « Dial-A-Ride Problem » (DARP). Le DARP est souvent orienté vers le transport de patient entre leur domicile et les centres d'examens médicaux ou d'hospitalisation. On distingue deux types de DARP :

- Le DARP statique où les activités de transport sont connues à l'avance,
- Le DARP dynamique dans lequel les tournées sont construites en temps réel dans la mesure où certaines activités apparaissent dynamiquement.

(Parragh S. , 2009) indique que les éléments qui différencient le PDP-TW du DARP Statique concernent le type de produit transporté, le PDP-TW concerne le transport de produits et le DARP le transport de passagers (Tableau 34). Cette différence implique quelques modifications et/ou des critères d'évaluation adaptés au contexte.

Eléments	PDP-TW	DARP Statique
Contexte	Transport de <u>produits</u>	Transport de <u>personnes</u>
Capacité des véhicules	$Q_k \in \mathbb{R}^+$	$Q_k \in \mathbb{N}^+$
Activités de transport	N activités	N clients
À chaque nœud d'une activité, on a : - Une charge - Une durée de service - Une fenêtre de temps	$q_i \in \mathbb{R}^+$ s_i $[e_i, l_i]$	$q_i \in \mathbb{N}^+$ s_i $[e_i, l_i]$

Tableau 34 : Comparatif entre le DARP Statique et le PDP-TW

Nous avons étudié un certain nombre d'articles présentés dans le Tableau 35. Pour chaque article, nous donnons le contexte de l'étude, le type de problème de transport, les contraintes prises en compte, les critères de performance ainsi que la méthode de résolution.

Nous avons ajouté le contexte qui permet de situer le cadre de l'étude. Le contexte intitulé « transport » indique qu'il s'agit d'une étude théorique non appliquée à un système réel.

Les contraintes prises en compte sont :

- contraintes de précedence entre deux activités : une personne fait 2 trajets, le premier pour se rendre à son centre d'examen, le second pour retourner à son lieu d'hébergement,

- contrainte d'incompatibilité entre les types de charge : une personne dans une situation particulière ne peut voyager avec une autre personne,
- contraintes de fenêtres de temps,
- contraintes de durée maximale de tournée,
- contraintes de durée maximum de conduite,
- contrainte de disponibilité des véhicules.

Les principaux indicateurs de performance utilisés sont:

- Nombre de véhicules : Nombre de véhicules utilisés ;
- Capacité dépassée : certains auteurs se sont autorisés à relâcher cette contrainte, ce critère est défini comme la différence entre la capacité du véhicule et la charge du véhicule au nœud j après le service (chargement ou déchargement).
- Durée totale : la durée inclut les durées de transport et éventuellement les durées d'attente, de chargement, de déchargement et de pause ;
- Attente du véhicule : ce critère est obtenu par la différence entre la date e_i de la fenêtre de temps et la date effective d'arrivée du véhicule ;
- Attente Client : l'attente est évaluée par la différence entre la durée effective de séjour du client dans le véhicule et la durée maximum de trajet souhaitée ;
- Retard : le retard est calculé par la différence entre la date de fin souhaitée et la date effective de fin de service ou de départ du véhicule ;
- Violation des fenêtres de temps : il s'agit du nombre de fenêtres de temps qui ne sont pas respectées ;
- Nombre de clients servis : un client est servi lorsque la collecte et la livraison sont réalisées ;
- Heures supplémentaires : elles sont calculées par la différence entre la date effective de fin de la tournée et la date de fin souhaitée de la tournée (fenêtre de temps liées au dépôt ou aux véhicules) ;
- Distance totale des tournées : la distance totale parcourue pour effectuer les trajets entre les différents nœuds (y compris le dépôt) ;
- Distance Totale parcourue par les clients : cette distance exclut les distances parcourues à vide.

Caractéristiques		Articles										
Contexte	Transport	x		x			x		x			
	Patients		x		x			x		x		
	Transport public					x						
	Produits hospitaliers											x
Pb	PDP-TW			x			x					x
	DARP	x	x		x	x		x	x	x	x	
Contraintes	Précédence entre 2 activités							x		x		
	Incompatibilité entre les types de charges									x		
	Fenêtre de temps	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x
	Durée maximale de tournée				x	x	x		x	x	x	
	Durée maximum de conduite	x	x			x			x	x	x	x
	Disponibilité des véhicules			x			x					
Indicateurs de performance	Nombre de véhicules					x	x	x		x		
	Capacité dépassée								x		x	
	Durée totale	x	x		x		x	x	x	x		
	Attente du véhicule							x			x	
	Attente client				x			x			x	
	Retard			x				x	x		x	x
	Violation des Fenêtres de temps						x					
	Nombre de Clients Servis	x			x							
	Heures Supplémentaires							x	x		x	x
	Distance totale des tournées			x					x	x		
Résolution	Distance Totale parcourue par les clients									x	x	
	Recuit simulé	x			x							
	Recherche tabou	x	x	x			x	x	x	x		x
	Recherche à voisinage variable											x
	Algorithme Génétique	x				x				x	x	x
	Réseaux de neurones	x										
	Colonies de fourmis	x										

Tableau 35 : Caractéristiques des différentes références du PDPTW

Comme le montre le Tableau 35, les études prennent en compte un nombre très varié de critères pour évaluer la qualité d'une solution. Nous avons identifié 11 critères différents et les études pren-

nent en compte entre 1 et 6 critères. Une grande partie des critères concerne surtout le respect des dates : dates de début et dates de fin que ce soit pour les activités, les véhicules ou les clients. Les autres concernent l'utilisation des ressources et les durées de trajet. Nous allons maintenant présenter les méthodes de résolution adoptées par les différents auteurs.

Les différentes méthodes utilisées sont présentées dans le Tableau 35. Les références que nous avons sélectionnées ont utilisé principalement des méthodes basées sur un individu et d'autres sur des méthodes basées sur une population. D'après (Landrieu, 2001), les métaheuristiques permettent l'obtention de bonnes solutions sur des problèmes de tournées de véhicules au sens large.

3.2.1. Méthodes basées sur un individu

Nous allons décrire en détail ces méthodes en présentant le codage des solutions, les systèmes de voisinage et les résultats obtenus par les différents auteurs les ayant utilisées.

3.2.1.1. Codage des solutions

Les méthodes de résolution utilisant des métaheuristiques impliquent différentes caractéristiques qui doivent être définies : le principe de codage de la solution et le système de voisinage. Nous commencerons par présenter les différents codages possibles d'une solution.

La représentation de la solution est souvent liée au type de problème étudié et également à la méthode de résolution utilisée. Nous avons identifié une différence de codage lorsque le problème est résolu avec une métaheuristique basée individu et une métaheuristique basée population.

La Figure 40 donne une représentation couramment utilisée dans le cas de l'utilisation de méthode basée individu, pour les problèmes de transport. Nous retrouvons ce type de codage dans (Aldaihani & Dessouki, 2003), (Taillard, Badeau, Gendreau, Guertin, & Potin, 1997), (Nanry & Barnes, 2000), (Melachrinoudis, Ilhan, & Min, 2000) et (Parragh, Doerner, & Hartl, 2009).

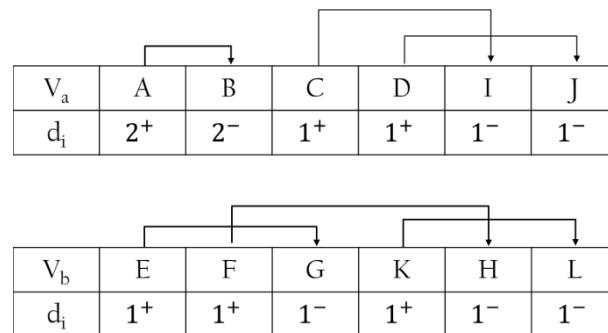


Figure 40 : Exemple de codage d'une solution

Chaque véhicule a une liste de nœuds à visiter, le véhicule V_a commencera par visiter les nœuds A et B, qui composent une seule et même activité de transport. Les activités sont représentées par des flèches qui relient deux nœuds (par exemple les nœuds A et B font partie de la même activité de transport). Les chiffres donnent la taille de la charge qui sera chargée dans le véhicule (2^+ pour un chargement de taille 2) ou déchargée du véhicule (2^- pour un déchargement de taille 2). Le codage consiste donc à affecter une séquence de nœuds à chaque véhicule. Cette affectation est construite tout en s'assurant que chaque paire de nœuds constituant une activité de transport sont affectées au même véhicule, puis les contraintes de précédence entre les nœuds sont ensuite vérifiées (flèche).

3.2.1.2. Systèmes de voisinage

Il existe deux types de système de voisinage :

- Les systèmes de voisinage qui consistent à déplacer un nœud ou une activité de transport (ou paire de nœuds) ;
- Les systèmes de voisinage qui permettent de déplacer des séquences de nœuds, c'est-à-dire plusieurs activités de transport.

Les figures que nous présentons pour illustrer les mouvements, sont composées de deux parties : celle de droite représente l'état des solutions avant mouvement et celle de gauche représente l'état des solutions après mouvement. Les nœuds encadrés sont les nœuds qui vont être déplacés (figure de gauche) et une fois déplacés (figure de droite).

Systèmes de voisinage basés sur le déplacement d'un nœud ou d'une activité

(Nanry & Barnes, 2000) proposent des systèmes de voisinage basés sur le déplacement d'un ou plusieurs nœuds ou d'une ou plusieurs activités de transport :

- **Single Paired Insertion (SPI)** : ce mouvement consiste à insérer une paire de nœuds choisie aléatoirement dans une autre tournée choisie aléatoirement (Figure 41). La paire de nœuds composant l'activité de transport est alors insérée dans la seconde tournée tout en respectant la contrainte de précédence entre la collecte et la livraison et la contrainte de capacité ;

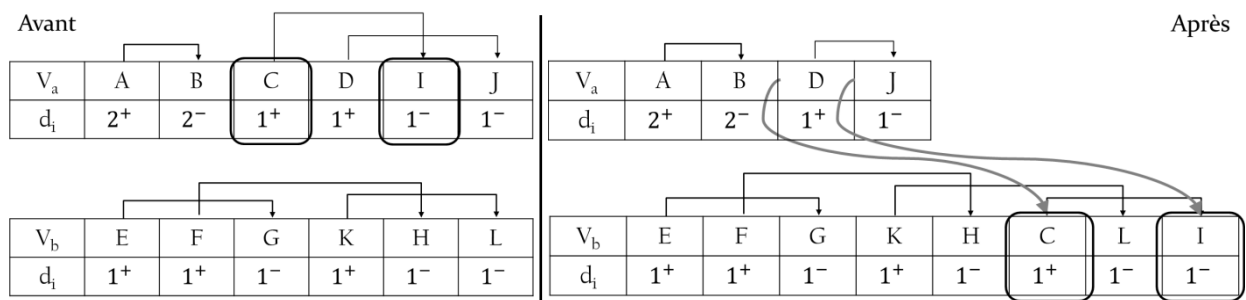


Figure 41 : Insertion d'activité de transport (SPI)

- **Swapping pairs Between Routes (SBR)** : ce mouvement consiste à échanger deux activités de transport, chaque activité de transport est sélectionnée aléatoirement dans une tournée (Figure 42) choisie aléatoirement. Le mouvement peut se faire à l'intérieur d'une même tournée ou entre deux tournées différentes. Les contraintes de précédence et de capacité doivent être respectées ;

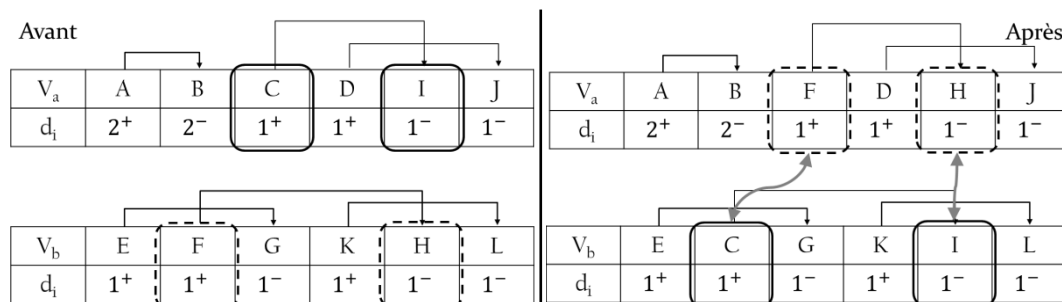


Figure 42 : Echange d'activités de transport (SBR)

- **Within Route Insertion (WRI)** : ce mouvement consiste à déplacer un nœud dans une tournée, tout en respectant la contrainte de précédence entre la collecte et la livraison (Figure 43). Pour illustrer ce déplacement, nous avons choisi deux cas : le cas du déplacement d'un nœud de collecte et le cas du déplacement d'un nœud de livraison. Nous avons indiqué avec les flèches horizontales les positions possibles pour les nœuds sélectionnés ;

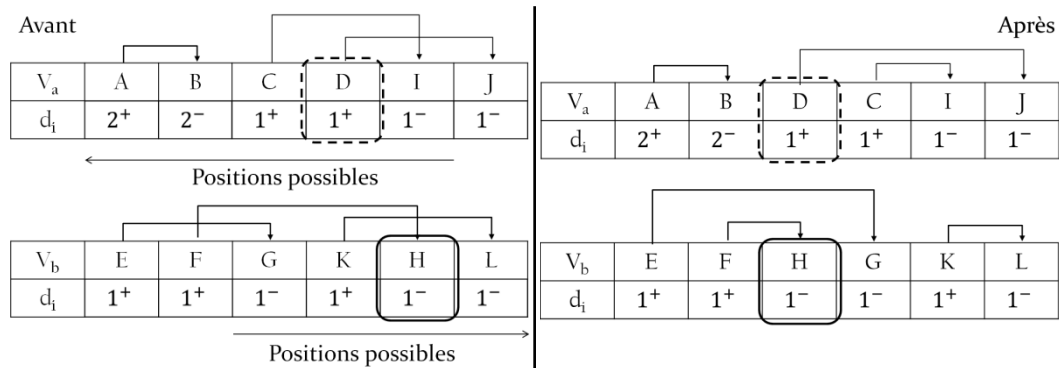


Figure 43 : Insertion de nœud (WRI)

Systèmes de voisinage basés sur le déplacement d'une séquence de nœuds

(Parragh S. , 2009) propose un système de voisinage basé sur le déplacement d'une séquence de nœuds.

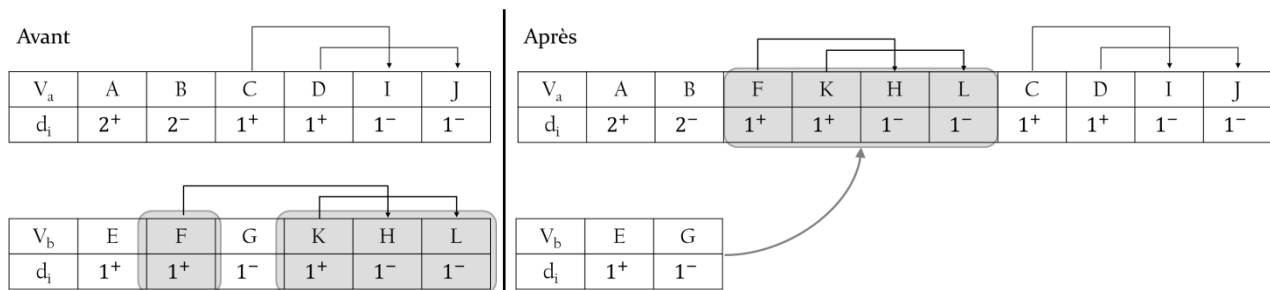


Figure 44 : Insertion d'une séquence de nœuds (MN)

- Move Neighborhood (MN) (Figure 44) : il consiste à déplacer une séquence d'activités d'une tournée à une autre. Les activités de transport à déplacer sont sélectionnées aléatoirement. L'insertion de ces activités sélectionnées est réalisée selon deux méthodes distinctes :
 - soit aléatoirement dans la seconde tournée ;
 - soit en fonction de la distance entre un des nœuds appartenant à la seconde tournée et le premier nœud de la séquence à insérer ;

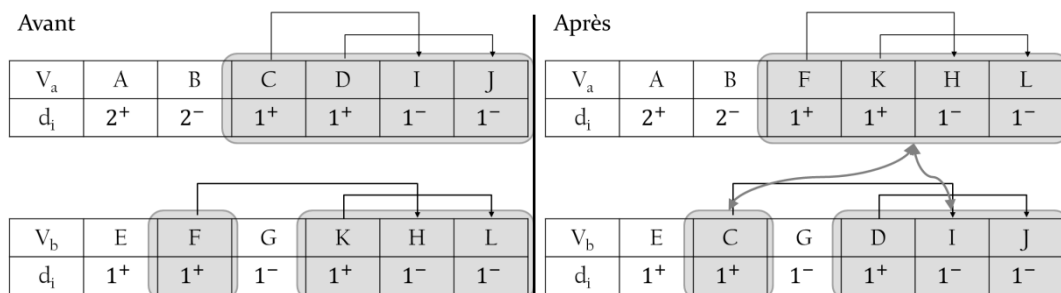


Figure 45 : Séquence de nœuds pour un échange (SN)

- Swap Neighborhood (SN) (Figure 45) : il s'agit de permuter deux séquences choisies aléatoirement. Deux tournées sont choisies aléatoirement, puis, pour chaque tournée, on sélectionne une séquence de nœuds à échanger. La longueur de la séquence est fixée au départ, le point de départ de la séquence est choisi aléatoirement. La séquence sélectionnée est composée d'un certain nombre de nœuds et on s'assure que tous les nœuds constitutifs d'une activité de transport appartenant à la séquence sont pris en compte. Dans la Figure 45, la séquence sélectionnée est composée de 3 nœuds. Les paires (K, L) et (H, F) composent une activité de transport. Par conséquent, la séquence déplacée sera composée des nœuds F, K, H et L. La

séquence à déplacer pour le véhicule a est composée des nœuds C, D, I et J. Les deux séquences choisies aléatoirement sont échangées ;

- **Chain Neighborhood (CN)** : le troisième voisinage applique l'idée d'éjection de chaîne. Dans une première étape, deux tournées sont choisies. Une séquence de nœuds (sélectionnée comme dans le SN), issue de la première tournée, est déplacée dans la deuxième tournée. Dans une deuxième étape, la séquence qui diminue le plus la valeur de la fonction objectif de la seconde tournée est sélectionnée puis déplacée dans une troisième tournée. La deuxième étape est répétée jusqu'à ce que le nombre maximum des séquences à déplacer ait été atteint. Ce nombre est défini au début et représente à la fois le nombre de séquences à déplacer et le nombre de requêtes sélectionnées aléatoirement.

Le Tableau 36 précise les différents systèmes de voisinage utilisés dans les travaux que nous avons étudiés.

Références	Méthodes	SPI	SBR	WRI	SN	MN	CN
(Taillard, Badeau, Gendreau, Guertin, & Potin, 1997)	Recherche tabou				x		
(Nanry & Barnes, 2000)	Recherche tabou	x	x	x			
(Melachrinoudis, Ilhan, & Min, 2000)	Recherche tabou	x	x	x			
(Cordeau & Laporte, 2003)	Recherche tabou	x	x	x			
(Aldaihani & Dessouki, 2003)	Recherche tabou	x	x	x			
(Parragh, Doerner, & Hartl, 2009)	Recherche à voisinage variable				x	x	x

Tableau 36 : Comparaison entre les méthodes de résolution utilisées pour le DARP statique

En règle générale, la recherche tabou est basée sur les systèmes de type SPI, SBR et WRI, l'algorithme génétique est basé sur le système CN et pour finir la recherche à voisinage variable est basée sur les systèmes SN, MN et CN.

3.2.1.3. Quelques résultats

Pour trouver une solution au problème du DARP, (Cordeau & Laporte, 2003) proposent d'utiliser une recherche tabou. Afin d'éviter des cycles, une liste de mouvements tabous est générée afin d'empêcher de revenir sur des solutions déjà testées. Comme dans la plupart des métaheuristiques, un mécanisme de diversification est mis en place afin de réduire les ressemblances entre les solutions et de tomber dans un minimum local. Dans leur cas, les auteurs ont utilisé 3 types de voisinage : SPI, SBR et WRI. Les instances créées aléatoirement ont entre 24 et 144 activités et servent à tester 3 procédures pour l'évaluation des solutions :

- P₁ : la procédure visant à minimiser les temps de conduite,
- P₂ : la procédure visant à minimiser les durées des tournées,
- P₃ : la procédure visant à minimiser les temps de conduite et les durées de des tournées.

Les auteurs ont ensuite testé leurs 3 procédures sur des instances réelles qui comptent entre 200 et 295 activités. P₂ et P₃ donnent de meilleurs résultats que P₁ malgré un temps d'exécution plus long, comme l'ont démontré les séries de tests précédents. Les auteurs ont alors décidé de comparer les solutions obtenues avec un critère supplémentaire : la durée d'attente. Ce nouveau critère indique

que même si les durées moyennes totales des tournées et les temps moyens de conduites sont meilleurs avec P₃, les durées moyennes d'attente sont meilleures pour P₂. En revanche, pour quelques instances, P₁ présente une solution meilleure que P₂ et P₃, sur l'ensemble des critères.

(Parragh, Doerner, & Hartl, 2009) ont repris le problème exposé dans (Cordeau & Laporte, 2003) et ont utilisé une méthode de recherche à voisinage variable.

Cette méthode consiste à utiliser successivement différents systèmes de voisinage tels que le SN, MN et CN. L'algorithme d'optimisation consiste à comparer les solutions obtenues, en premier lieu par le critère : nombre de véhicules (NV), puis par la valeur de la fonction objectif. Les auteurs ont testé cette méthode et comparé les résultats obtenus avec la recherche tabou et un algorithme génétique sur les instances présentées dans (Cordeau & Laporte, 2003) et (Jorgensen, Larsen, & Bergovinsdottir, 2007). Les résultats obtenus avec la recherche tabou montrent qu'elle est plus efficace que l'algorithme génétique. En effet, cette méthode permet d'améliorer les résultats de la fonction objectif de 23% en moyenne sur l'ensemble des instances testées.

(Melachrinoudis, Ilhan, & Min, 2000) ont étudié un problème de tournée de patients entre des centres de désintoxication et des centres médicaux (hôpitaux, médecins,...). Pour cela, ils disposent d'une flotte de véhicule située à un dépôt, différent des lieux à visiter. Ces patients doivent effectuer deux transports dans une journée, ils vont à leur rendez-vous médical (entretien, traitement, visite médicale, visite dentaire) et retournent à leur centre de désintoxication. Par conséquent, il existe une contrainte de précédence entre les transports : le patient doit d'abord être amené au centre médical avant de retourner au centre de désintoxication. En fonction de la nature des examens médicaux, les patients à transporter ont un coefficient de priorité. Les hypothèses prises en compte dans ce problème sont :

- les temps de chargement et de déchargement à chaque nœud sont négligeables,
- le chauffeur ne prend pas de pause,
- le temps de trajet entre deux nœuds est symétrique.

L'objectif de leur étude est de trouver une solution qui minimise le coût de transport et l'insatisfaction des clients tout en respectant la capacité des véhicules. Les auteurs utilisent une recherche tabou. La solution initiale est construite selon l'ordre de priorité des clients. Une fois la solution initiale construite, les auteurs utilisent le voisinage de type SPI, tout en respectant la contrainte de capacité du véhicule ainsi que la contrainte de précédence entre les activités. Ils ont comparé les résultats obtenus par un programme linéaire et la recherche tabou. Pour chaque instance de leur problème, comprenant chacune 50 activités de transport et 15 dépôts, la recherche tabou a permis de trouver une solution en moins d'une seconde avec une déviation de 2% au maximum par rapport à la solution optimale.

3.2.2. Méthodes basées sur une population

3.2.2.1. Codage des solutions

D'autres représentations sont utilisées pour permettre la mise en œuvre d'une méthode de résolution basée sur une population. Dans (Jorgensen, Larsen, & Bergovinsdottir, 2007), la solution est construite en deux étapes : l'affectation des clients, puis l'ordonnancement des visites. Lors de la première étape, une solution peut être représentée comme suit (Figure 46).

	Dépôt	Cliant 1	Cliant 2	Cliant 3	Cliant 4	Cliant 5	Cliant 6	Cliant 7	Cliant 8	Cliant 9	Cliant 10	Cliant 11	Cliant 12	Cliant 13	Cliant 14	Cliant 15	Cliant 16	..
Tournée 1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	...
Tournée 2	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	...
Tournée 3	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	...
Tournée 4	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	...

Figure 46 : Exemple de solution (chromosome) pour (Jorgensen, Larsen, & Bergovinsdottir, 2007)

La solution contient autant de colonnes que de clients à servir, tout en ajoutant les colonnes pour le dépôt, et autant de ligne que de tournées. L'affectation des clients (ou activité de transport) à une tournée est indiquée par la valeur 1, lorsque le client n'est pas affecté la valeur est alors 0. Ainsi, dans cet exemple, la tournée 1 comprend le dépôt, puis la visite des clients 2,4,8,9,10 et 15. Il y a autant de tournées que de véhicules disponibles. Chaque client est affecté exactement à une tournée et chaque tournée inclut le dépôt.

La seconde étape consiste à ordonnancer les visites chez les clients. Nous avons illustré un exemple pour la tournée 1 dans la Figure 47.

Dépôt	9.1	15.1	15.2	2.1	9.2	8.1	10.1	8.2	2.2	10.2	4.1	4.2	Dépôt
-------	-----	------	------	-----	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	-------

Figure 47 : Exemple de tournée à partir des informations contenues dans la figure précédente

La tournée est construite de manière à respecter que les collectes (*i. 1*) soient toujours placées avant les livraisons (*i. 2*). Par exemple, la tournée commence par la collecte au client 9 (9.1), puis continue par une autre collecte au client 15 (15.1), et ainsi de suite. Les auteurs ne précisent pas comment est construit l'ordre de visite chez les clients.

(Kergosien, 2010) propose le codage suivant pour une solution (Figure 48).

1	A
1	B
2	E
2	D
1	C

Figure 48 : Exemple du codage d'une solution

Le premier véhicule doit réaliser les activités qui lui sont affectées, dans l'ordre suivant : A, B, C. Le second doit d'abord réaliser l'activité E avant l'activité D, selon la Figure 48.

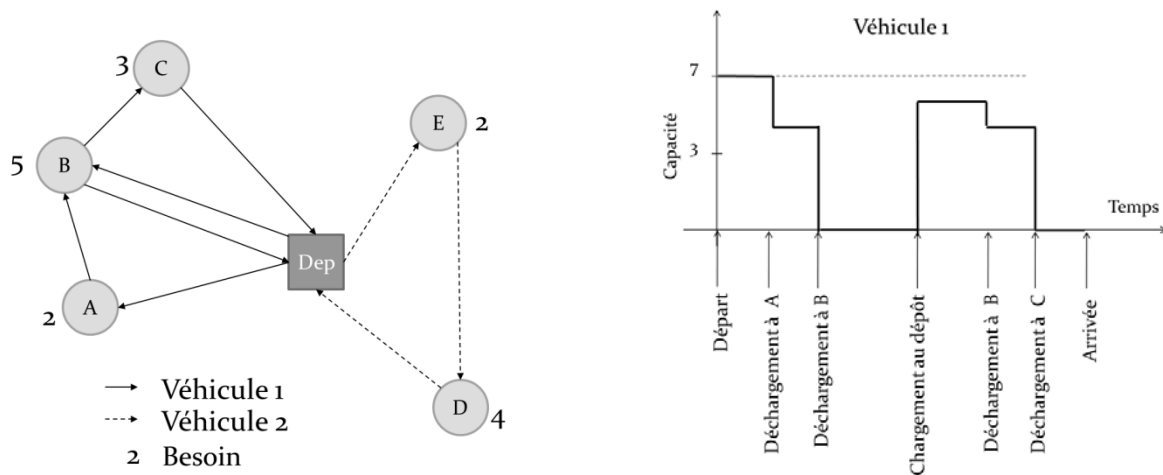


Figure 49 : Exemple de solution pour (Kergosien, 2010)

Le véhicule 1 débute sa tournée avec A, puis B. La capacité du véhicule n'étant pas suffisante pour prendre en charge entièrement les produits pour B, le véhicule retourne au dépôt et reprend sa tournée en finissant la livraison pour B et termine avec C.

3.2.2.2. Opérateurs de croisement

(Jorgensen, Larsen, & Bergovinsdottir, 2007) utilisent un opérateur de croisement qui consiste à sélectionner deux parents. Le premier parent est sélectionné suivant une procédure « roulette wheel method » et le second aléatoirement. Une fois les parents sélectionnés, les auteurs utilisent la méthode de croisement présenté par (Pereira, Tavares, Machado, & Costa, 2002). Cette méthode consiste à choisir aléatoirement une séquence sur le second parent et à l'insérer dans la séquence du premier parent. En dehors de cette séquence l'enfant est une copie du premier parent.

(Kergosien, 2010) utilise deux types d'opérateur de croisement :

- Le premier type consiste à recopier un segment d'un parent P₂ dans un individu enfant E₁ et à compléter cet individu avec le segment du parent P₁. Ce type d'opérateur est appelé le Partially Mapped Crossover défini par (Goldberg, 1989) ;
- Le deuxième type d'opérateur est un opérateur de type insertion qui correspond au système de voisinage de type MN que nous avons décrit dans la section système de voisinage.

L'auteur utilise également un opérateur de mutation. Cet opérateur consiste à affecter une probabilité faible de muter (25%) à chaque individu. Dans le cas où l'individu subit une mutation, il y a deux possibilités de mutation :

- Un gène (séquence de nœuds choisie aléatoirement) est affecté à un autre véhicule ;
- Un gène sélectionné aléatoirement est déplacé dans la solution.

3.2.2.3. Quelques résultats

(Jorgensen, Larsen, & Bergovinsdottir, 2007) ont repris les travaux exposés dans (Cordeau & Laporte, 2003) et utilisent un algorithme génétique. Ils ont comparé les résultats de leur méthode par rapport à celle présentée dans (Cordeau & Laporte, 2003) sur les mêmes instances. Leur méthode permet d'obtenir de meilleurs résultats sur les critères de temps d'attente des véhicules (40%) et sur les temps de conduite (9%). Par contre, la durée totale des tournées est augmentée de 14%.

(Rekiek, Delchambre, & Saleh, 2006) proposent une étude sur le transport de personnes âgées et handicapées. Il s'agit de transporter des patients depuis une origine jusqu'à leur destination. Le transport se fait depuis le domicile de la personne (dans le cas d'un déplacement pour un examen

médical), vers un hôpital, un médecin ou un centre d'examen médical. Le transport inverse concerne le retour des patients vers leur lieu d'hébergement. Dans ce contexte, les patients doivent effectuer deux types de transport dans une même journée : vers le centre d'examen médical puis de retour vers leur lieu d'hébergement. Ces personnes peuvent être transportées individuellement ou ensemble. Pour effectuer ces transports, une flotte de véhicule hétérogène est mise à disposition dans plusieurs dépôts. Les auteurs ont modélisé leur problème comme un DARP particulier : « Handicapped Person Transportation » (HPT). Les hypothèses prises en compte dans ce problème sont :

- L'ensemble des activités de transport de tournée avec leur origine, leur destination et le nombre de personne à prendre en charge est connu à l'avance ;
- Les fenêtres de temps à l'origine et à la destination sont connues ;
- Les durées maximales de trajet sont connues pour chaque activité de transport ;
- Chaque véhicule a une capacité connue.

L'objectif du problème est de trouver une solution dans laquelle l'ensemble des activités de transport est réalisé avec un nombre minimum de véhicules. Pour résoudre ce problème, (Rekiek, Delchambre, & Saleh, 2006) proposent l'utilisation d'un algorithme génétique. Les auteurs ont utilisé leur méthode sur des instances qui contiennent entre 100 et 164 clients. Uniquement les instances avec 164 clients présentent des difficultés : entre 1 et 3 clients ne sont pas servis.

Ce qui serait intéressant, c'est de montrer quelle est la meilleure méthode de résolution. Dans ses travaux, (Kergosien, 2010) présente une comparaison des résultats obtenus par un algorithme génétique et une recherche tabou. Les 100 instances testées sont générées aléatoirement. Les données sont composées de 4 dépôts, 9 sites de consommation, la période de planification est de 5 jours, 16 véhicules de capacités différentes, 3 fenwicks, 25 personnes disponibles qui peuvent être soit des chauffeurs, soit des manutentionnaires. L'algorithme génétique est paramétré de la manière suivante :

- taille de la population : 100 individus,
- probabilité de mutation : 25%,
- nombre de tournées inter-hôpitaux : 5,
- nombre de tournées intra-hôpitaux : 7.

Pour la recherche tabou, différents paramètres sont donnés : la taille de la liste tabou (Tlt) et la taille de l'opérateur de voisinage de type de déplacement d'une demande (Op_{mov}). L'auteur a obtenu les meilleurs résultats avec des paramètres fixés entre 40 et 60 pour Op_{mov} et 15, 10 et 5 pour Tlt . La recherche tabou a également démontré son efficacité pour sa rapidité d'exécution : 6 fois moins de temps que pour l'algorithme génétique et pour ses résultats cinq fois meilleurs.

3.3. Le PDP-TW-FL

Ce type de problème concerne une variété de situations où les véhicules doivent réaliser un certain nombre de transports entre une paire de villes et où, pour chaque transport, la quantité à transporter remplit complètement le véhicule ($q_i = Q_k = 1, \forall i \in N$ et $\forall k \in K$). (Desrosiers, Laporte, Sauve, Soumis, & Taillefer, 1988) ont décrit avec précision le problème de tournée avec charges complètes. Ce problème consiste à construire des tournées de distribution en minimisant la distance totale parcourue tout en respectant les contraintes :

- Toutes les charges sont déplacées depuis leur origine jusqu'à leur destination ;
- Chaque véhicule commence et finit sa tournée à son dépôt ;
- La durée de la tournée ne doit pas excéder une durée maximale prédéfinie T .

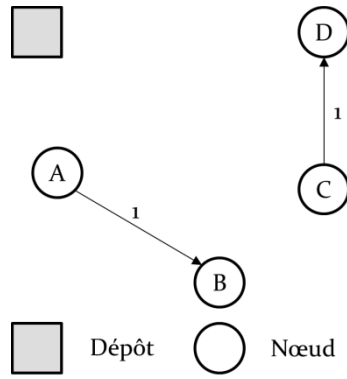


Figure 50 : Exemple de données pour un problème de tournée avec charges complètes

La Figure 50 indique que deux activités de transport sont à réaliser entre les nœuds A et B, et entre les nœuds C et D. La charge à transporter entre ces nœuds est évidemment de 1. Le véhicule commencera sa tournée à partir du dépôt.

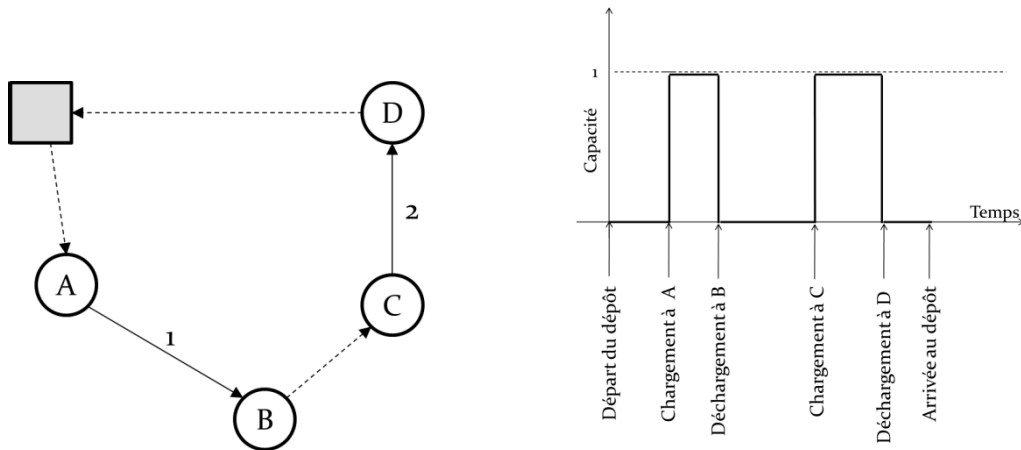


Figure 51 : Exemple de tournée pour le transport avec charges complètes

Une solution est présentée sur Figure 51. Le problème devient alors un problème d'ordonnancement qui consiste à définir l'ordre dans lequel doit être réaliser les activités : (A,B) puis (C,D) ou (C,D) puis (A,B).

L'extension FL impacte les contraintes 3.51 et 3.55, de la manière suivante :

$$\text{si } x_{j,l}^k = 1 \text{ alors } y_j + 1 = y_l, \text{ pour tout } j, l \in V, k \in M \quad 3.60$$

$$y_i \in \{0,1\}, \text{ pour tout } i \in N \quad 3.61$$

La capacité du véhicule est $Q_k = 1$, la variable y devient donc binaire. Etant donné que chaque collecte est immédiatement suivie d'une livraison, les contraintes de fenêtres de temps sont définies pour une activité.

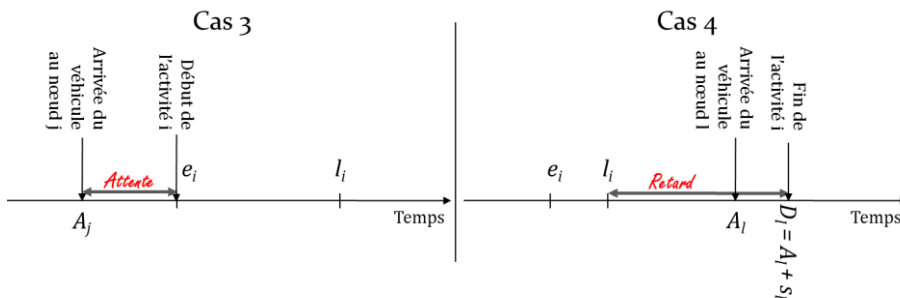


Figure 52 : Contraintes de fenêtre de temps dans le cas du PDP-TW-FL

Dans le cas d'un problème avec charges complètes, les fenêtres de temps impactent la date de début au plus tôt et la date de fin au plus tard de l'activité i , contrairement au problème présenté précédemment où les contraintes de fenêtres de temps étaient liées aux nœuds visités. Dans le cas 5 (Figure 52), le véhicule arrive en avance au nœud j par rapport à la date de début au plus tôt e_i de l'activité i , le véhicule attendra que la date de début soit atteinte pour commencer le service au point j . Dans le cas 6 où le véhicule arrive après la date de fin au plus tard de l'activité i un retard est alors constaté.

Nous avons classifié les articles dans le Tableau 37 selon les contraintes, les critères de performance et les méthodes de résolution.

Les travaux existants peuvent être distingués par les contraintes prises en compte :

- Contrainte de durée maximum de tournée : la durée des tournées doit être inférieure à la durée maximale ;
- Contrainte de fenêtre de temps : chaque activité de transport est soumise à des fenêtres de temps définies par une date de début au plus tôt de l'activité et une date de fin au plus tard de l'activité ;
- Contrainte de transport à vide : les véhicules doivent réaliser un transport à vide dans différents cas :
 - Entre le dépôt et le nœud de collecte de la première activité, si le dépôt et ce nœud sont distincts ;
 - Entre le nœud de livraison de l'activité i et le nœud de collecte de l'activité $i + 1$, dans le cas où ces nœuds sont distincts ;
 - Entre le nœud de livraison de la dernière activité et le dépôt.

Les critères de performances sont :

- coût total de l'ensemble des tournées exprimé en heures ou en distance,
- nombre de véhicules utilisés pour réaliser les tournées,
- nombre de transports à vide.

Références		(Doerner, Hartl, & Reimann, 2000)	(Doerner, Hartl, & Reimann, 2001)	(Gronalt, Hartl, & Reimann, 2003)	(Gingras, Cordeau, & Laporte, 2007)	(Caris & Janssens, 2009)
Con- traintes	Durée maximale de tournée	x	x	x	x	x
	Fenêtre de temps	x	x	x		x
	Transports à vide			x		
Critères	Coût total	x	x	x	x	x
	Nombre de véhicules	x	x			
	Nombre de transports à vide			x		
Résolu- tion	Colonie de fourmis (ACO)	x	x			
	Heuristique de gains			x	x	
	Recherche Locale					x

Tableau 37 : Les caractéristiques des différentes références du PDP-TW-FL

Nous pouvons voir que l'ensemble des études prend en compte la contrainte de durée maximum de tournée, quelques-unes les contraintes de fenêtre de temps. L'ensemble des études présentées dans ce tableau prennent en compte les transports à vide dans l'évaluation des solutions. L'objectif de l'étude de (Gronalt, Hartl, & Reimann, 2003) consiste à minimiser le nombre de transport à vide.

L'ensemble des références présentées prennent en compte le coût total, seulement quelques-unes ajoutent le nombre de véhicules ou le nombre de transports à vide. Nous nous sommes intéressés aux méthodes de résolution utilisées. Nous trouvons des heuristiques, des métaheuristiques basées individu et des métaheuristiques basées populations. Les méthodes de résolution sont extrêmement variées et nous allons décrire une méthode basée sur une heuristique. Malheureusement, aucun auteur n'indique la méthode utilisée pour l'évaluation des solutions.

3.4. Les autres types de problèmes de transport avec charges complètes

(Liu, Jiang, Fung, Chan, & Liu, 2010) proposent de travailler sur un problème de tournée de type : Multi-Depot Capacitated Arc Routing Problem with Full truckLoads (MD-CARP-FL). Plusieurs dépôts sont pris en compte. Les demandes peuvent avoir une quantité plus importante que la capacité du véhicule à transporter. Une flotte de véhicules est située dans différents dépôts et des activités de transports sont à réaliser par ces véhicules. Chaque véhicule doit commencer et terminer sa tournée au même dépôt. L'objectif de ce problème est de construire des tournées pour chaque véhicule pour réaliser l'ensemble des activités de transport tout en minimisant le coût total des tournées. Les hypothèses sont les suivantes :

- Toutes les activités sont connues à l'avance ;

- Les véhicules débutent et finissent leur tournée à vide ;
- Le coût de transport correspond à la distance séparant le nœud de collecte du nœud de livraison ;
- Une tournée de véhicule doit respecter une distance maximale donnée H . Cette restriction assure que les intervalles de maintenance des véhicules sont respectés. Cette contrainte peut également être exprimée en durée ;
- Les véhicules assurent un transport uniquement pour des charges complètes. Cela signifie que les charges sont transportées directement du nœud de collecte au nœud de livraison. Si une activité q est supérieure à la capacité Q du véhicule, le nombre de services à réaliser pour cette activité sera $\lceil q/Q \rceil$.

Afin de décrire le MD-CARP-FL, nous allons l'illustrer à l'aide d'un exemple présenté par la Figure 53. Dans cet exemple, nous avons 2 dépôts et 12 nœuds. Les tournées sont indiquées avec des flèches pleines pour les transports avec une charge et des flèches en pointillés pour les transports à vide. En ce qui concerne les activités de transport de charges de A vers B et de C vers D, il est nécessaire de faire deux transports pour transporter toute l'activité. Par conséquent, il y a deux transports entre les deux paires (A,B) et (C,D).

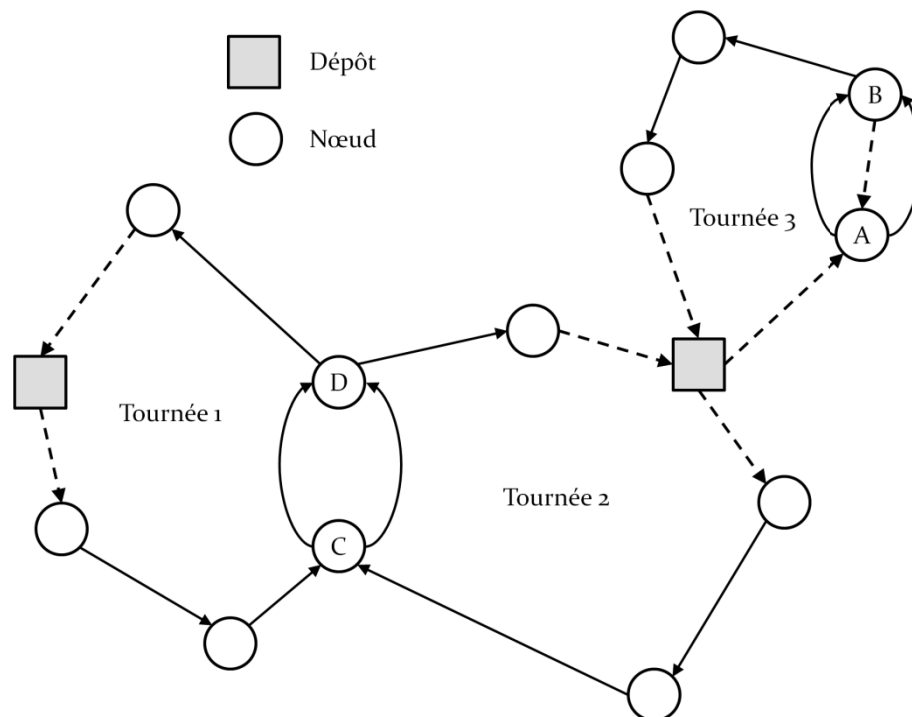


Figure 53 : Exemple du MD-CARP-FL selon (Liu, Jiang, Fung, Chan, & Liu, 2010)

Nous avons compté 12 transports avec une charge dans cet exemple qui sont effectués par trois tournées. Chaque tournée est affectée à un véhicule qui commence sa tournée du dépôt et retourne à ce même dépôt à la fin de sa tournée. Alors que les transports nécessaires entre C et D sont assurés par deux véhicules différents, les deux transports entre A et B sont assurés par le même véhicule qui réalise alors un transport à vide pour retourner à A.

Deux bornes inférieures sont proposées :

- (Gronalt, Hartl, & Reimann, 2003) ont utilisé une borne inférieure (BI1) pour évaluer l'efficacité de leur méthode de résolution. Cette borne est obtenue par simple modèle mathématique du réseau de flots. Mais dans leur étude, (Gronalt, Hartl, & Reimann, 2003), ne prennent pas en compte les transports à vide entre le dépôt et le premier nœud visité ;
- (Liu, Jiang, Fung, Chan, & Liu, 2010) proposent une seconde borne inférieure (BI2) basée sur les caractéristiques du MD-CARP-FL. Afin de minimiser le coût total des tournées construites, les nœuds de livraison d'une activité et de collecte de l'activité suivante doivent être identiques dans le but de minimiser les transports à vide. La borne inférieure proposée prend en compte le nombre de transports à vide pour un nombre de véhicules donné V_n et la distance maximale (H). Ce nombre de véhicules est obtenu de la manière suivante : $V_n = \lceil BI1/H \rceil$.

La méthode de résolution proposée est composée de trois phases :

- La première phase consiste à construire un ensemble de cycles qui permette de réaliser l'ensemble des activités ;
- La seconde phase consiste à relier les cycles en formant des tournées où chaque tournée correspond à un véhicule ;
- La dernière phase correspond à l'amélioration de la tournée grâce à l'utilisation d'une recherche locale.

Dans le cadre de leur étude, (Liu, Jiang, Fung, Chan, & Liu, 2010) utilisent deux types de système de voisinage : les mouvements intra-tournée et inter-tournée.

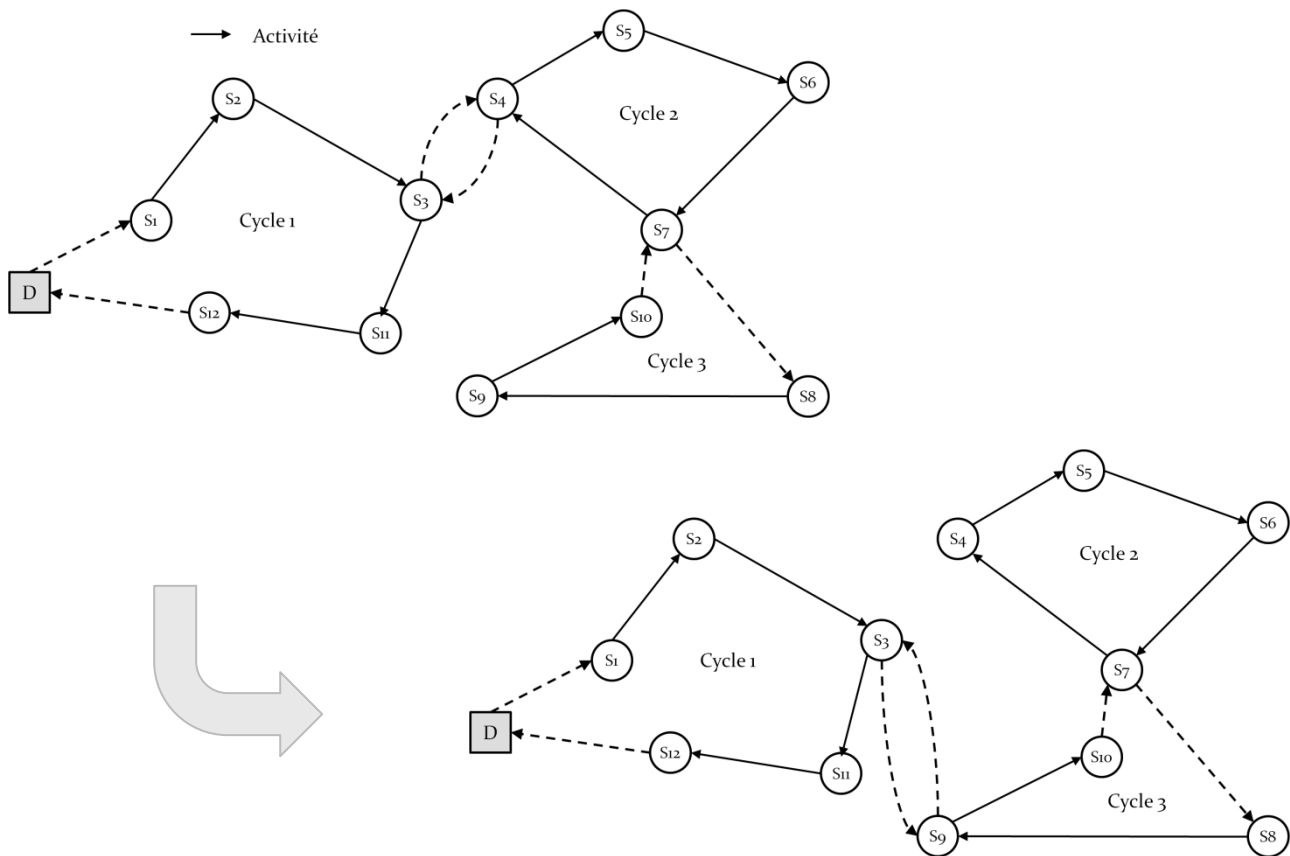


Figure 54 : Mouvement intra-tournée selon (Liu, Jiang, Fung, Chan, & Liu, 2010)

Le mouvement intra-tournée consiste à modifier l'enchaînement des cycles dans une tournée. La Figure 54 montre un mouvement de ce type. Dans la solution initiale, la tournée enchaîne le cycle 1, le cycle 2 et le cycle 3. Après avoir opéré un mouvement, la tournée enchaîne le cycle 1, le cycle 3 puis le cycle 2.

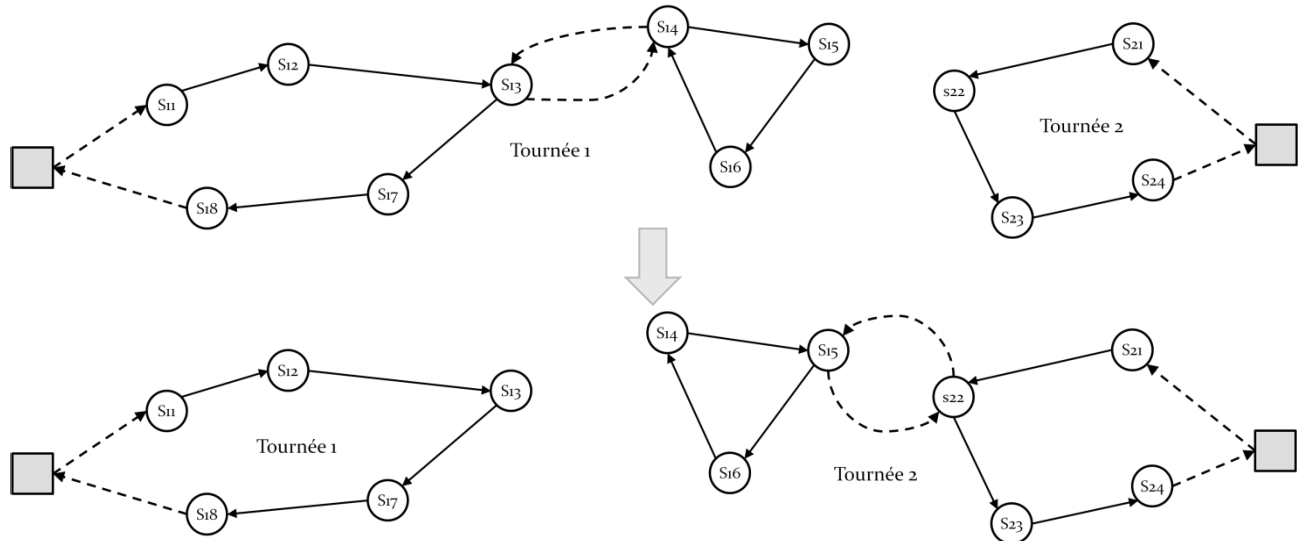


Figure 55 : mouvement inter-tournée selon (Liu, Jiang, Fung, Chan, & Liu, 2010)

La Figure 55 montre comment s'opère un changement entre deux tournées. Avant modification, nous avons deux tournées, la première visite les sommets S_{11} à S_{18} . La seconde passe par les sommets S_{21} à S_{24} . Après modification, la première tournée est réduite aux sommets S_{11} , S_{12} , S_{13} , S_{17} et S_{18} . La seconde tournée passe par l'ensemble des autres sommets dans cet ordre : S_{21} , S_{22} , S_{15} , S_{14} , S_{16} , S_{22} , S_{23} et S_{24} .

Les auteurs ont utilisé leur méthode. Différentes instances ont été utilisées pour tester leur méthode et les résultats ont démontré que la méthode proposée permet de trouver de bonnes solutions dans un temps d'exécution raisonnable (soit de 0.07s à plus de 177s en moyenne). En plus de leur étude sur la minimisation des distances totales parcourues, les auteurs ont étudié l'impact des valeurs de H et de l'emplacement des dépôts.

3.5. Conclusion

Nous avons identifié deux types de problèmes de transport proches de notre problème. Le Tableau 38 présente un comparatif entre les caractéristiques du PDP-TW, du Problème de tournée avec charges complètes (PDP-TW-FL) et celles de notre problème.

Caractéristiques	PDP-TW	PDP-TW-FL	Notre problème
Activités	n clients/activités	n voyages/demandes	n activités décomposées en 5 étapes
Fenêtre de temps à l'origine	$[e_i, l_i]$ où i est l'origine	$[e_i, l_i]$ où i est l'activité de transport	$[e_i, \infty[$ (date de début de la 1 ^{ère} étape de l'activité)
Fenêtre de temps à la destination	$[e_j, l_j]$ où j est la destination		$[0, l_i]$ (date de livraison souhaitée-fin de la 4 ^{ème} étape de l'activité)
Ressources	m véhicules	m véhicules	m postes de travail
Type de flotte	Homogène ou hétérogène	Homogène ou hétérogène	Hétérogène
Dépôt	Unique	Unique ou Multiple	Unique
Disponibilités des ressources	Fenêtre de temps sur le dépôt	Durée totale de la tournée limitée aux temps de conduite des chauffeurs	Planning des postes de travail, des lignes de production et des aires de nettoyage
Capacité des véhicules	$q_i \geq 1$	$q_i = 1$	$q_i = 1$
Taille de la charge	$d_i \geq 1$	$d_i = 1$	$d_i = 1$
Durée de trajet	Connue	Connue	Connue
Transport à vide entre le dépôt et la première activité	Oui	Oui	Oui
Transport à vide entre la destination et le dépôt	Oui	Oui	Oui
Transport à vide entre deux activités	Oui	Oui	Oui
Transport à vide entre une activité et le dépôt et du dépôt à l'activité suivante (changement de véhicule)	Non	Non	Oui
Contraintes de précédence entre les activités	Oui	Non	Oui
Prise en compte des ressources mobiles	Véhicules	Véhicules	Véhicules, chauffeurs et contenants
Prise en compte des ressources fixes	Aucune	Aucune	Quais, Lignes de production et aires de nettoyage

Tableau 38 : Comparaison des caractéristiques du PDP-TW, du PDP-TW-FL et de notre problème

Nous avons pu voir que de nombreuses méthodes ont été utilisées pour résoudre les problèmes de transport. Nous pouvons noter que notre problème simplifie le respect de la capacité étant donné que $q_i = d_i = 1$, tout comme le PDP-TW-FL. Ce dernier nous a semblé par bien des aspects, le plus proche de notre problème. Par contre, les caractéristiques suivantes ne sont pas intégrées dans la modélisation des problèmes de types PDP-TW ou DARP statique et le PDP-TW-FL :

- la décomposition des activités en étapes,

- les plannings d'ouverture des lignes de production et des aires de nettoyage (fenêtre de temps fermées),
- la gestion des transports à vide dans le cas de changement de véhicule,
- l'incompatibilité entre les véhicules et les activités,
- la prise en compte des diverses ressources mobiles et fixes.

4. Approche proposée

Notre problème est un PDP-TW-FL à contraintes de ressources et contraintes de précédence. Pour le résoudre, nous devons prendre en compte non seulement la construction de l'organisation des transports, mais également le grand nombre de ressources. Notre problème présente une double complexité. Pour prendre en compte la complexité liée à l'utilisation des ressources, nous proposons un modèle de simulation. Pour résoudre le problème d'ordonnancement, nous proposons une méta-heuristique. Un couplage entre la métaheuristique et le modèle de simulation permet de résoudre le problème global.

Nous illustrons la complexité de notre problème par un exemple. Ensuite, nous présentons notre proposition de résolution en détaillant chaque point clé : la métaheuristique et le modèle de simulation.

4.1. Complexité de notre problème

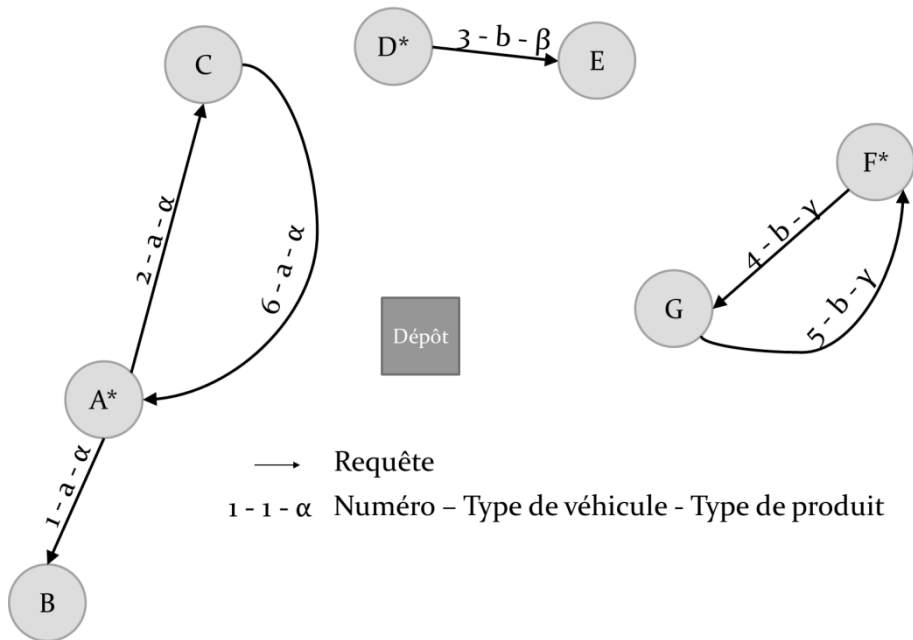


Figure 56 : Exemple pour notre problème

Dans cet exemple, différents types de produits sont à transporter entre les sites de production (identifiés par un astérisque) et les sites de consommation et vice versa. Dans notre exemple, il y a 4 activités de livraisons de contenant propre et 2 activités de retour de contenant sale. Chaque type de produit nécessite un type de véhicule particulier : le type α nécessite un véhicule de type a et les types β et γ peuvent être transportés par un véhicule de type b .

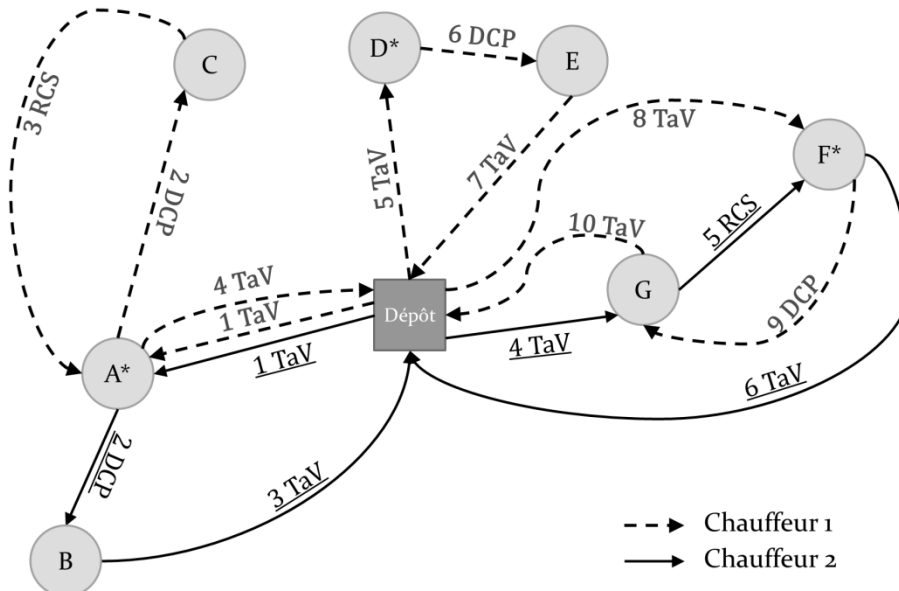


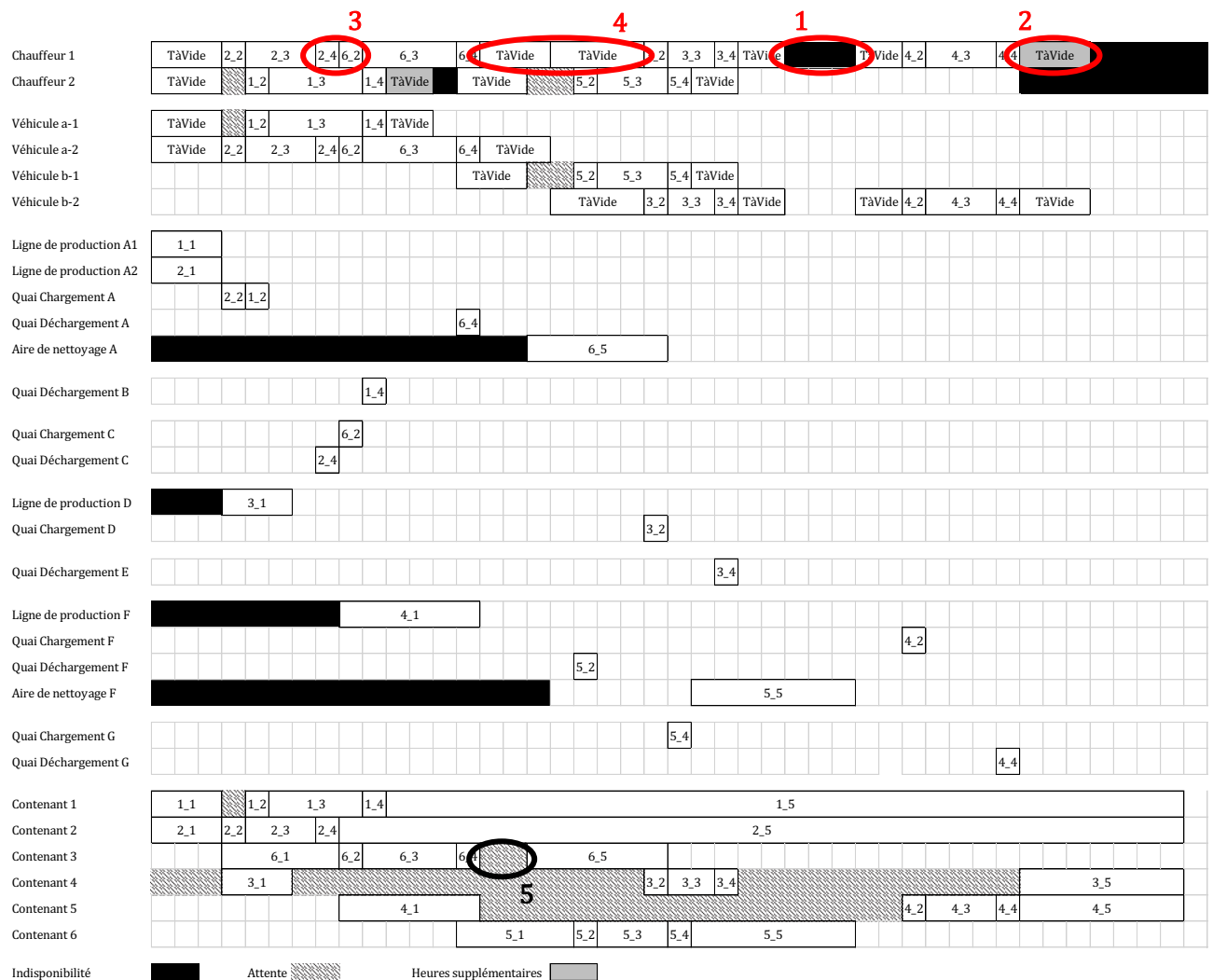
Figure 57 : Exemple d'organisation des transports pour notre problème

Pour la résolution de cet exemple, 2 chauffeurs travaillent et 4 véhicules sont utilisés : deux de type a qui pourront réaliser les activités 1, 2 et 6 et deux de type b qui réaliseront les activités 3, 4 et 5. Les traits en pointillés correspondent aux transports effectués par le premier chauffeur, les traits pleins par le second. De plus, pour faciliter la lecture de la figure, nous avons indiqué l'ordre des trajets en numérotant les flèches. Les activités de transport sont affectées aux chauffeurs selon un certain

ordre : le premier chauffeur effectue les activités 2, 6, 3 puis 4 et le deuxième chauffeur les activités 1 et 5. Les plannings d'une durée de 8h des chauffeurs sont composés de deux plages horaires séparées par une pause de 30 minutes.

De plus, nous prenons en compte la disponibilité des ressources. Pour cet exemple, 8 types de ressources sont pris en compte :

- pour le dépôt : les deux types de véhicules, les chauffeurs,
- pour chaque site : les quais (chargement et déchargement), les lignes de production, les aires de nettoyage et les contenants.



La Figure 58 présente un diagramme de Gantt de l'organisation des transports donnée dans la Figure 57. Les parties hachurées représentent des périodes d'attentes, les parties noires représentent les périodes d'indisponibilité liées aux plannings (plannings d'ouverture des lignes de production et des aires de nettoyage et plannings de travail des chauffeurs) et les parties grises représentent les heures supplémentaires des chauffeurs. Sur ce diagramme, X_Y représente l'étape Y de l'activité X.

Sur ce diagramme, nous avons illustré plus spécifiquement points suivants :

1. Le chauffeur réalise une pause entre les activités 3 et 4, pour la prendre, le chauffeur retourne au dépôt et repart ensuite réaliser la suite des activités,
2. Le chauffeur réalise 20 minutes d'heures supplémentaires (zones grises),

3. Le chauffeur 1 ne fait aucun transport à vide entre les activités 2 et 6 (site destination de l'activité 2 identique au site origine de l'activité 6),
4. Contrairement à la suite des activités où il réalise deux transports à vide consécutifs entre les activités 6 et 3 afin de changer de véhicules (incompatibilité entre les produits et les véhicules),
5. Les plannings d'ouverture et de fermeture des lignes de production ou des aires de nettoyage impliquent parfois des attentes, par exemple : la 5^{ème} étape de l'activité 6.

Cet exemple permet d'illustrer que non seulement l'organisation des tournées doit être construite, mais nous devons également prendre en compte l'utilisation des ressources qui sont très variées : les véhicules de différents types, les chauffeurs, les contenants, les quais, les lignes de productions et les aires de nettoyage, qui ont éventuellement chacun un planning pour travailler. Ainsi, pour évaluer les critères de performances, nous devons calculer l'ensemble des dates de début et de fin de chaque étape de chacune des activités de transport. Cette évaluation est relativement complexe étant donnée le nombre de ressources prises en compte.

Les problèmes de tournées de véhicules de type PDP sont des problèmes NP-difficiles selon (Salvesberg & Sol, 1995), de même que les problèmes d'ordonnancement de type RCPSp le sont également, selon (Blazewicz, Lenstra, & Rinnooy Kan, 1983). Nous pouvons même ajouter que le problème PDP-TW-FL est un problème NP-Difficile selon la démonstration de (Lee & Qi, 2009). Dans notre problème, nous avons identifié deux sous-problèmes : un problème d'ordonnancement des activités et un problème de type PDP-TW-FL. Ces problèmes étant tout deux NP-Difficiles, nous pouvons en conclure que notre problème l'est également.

De nombreux problèmes présentent une double complexité (Grangeon, 2001) (Figure 59) :

- Une complexité structurelle et fonctionnelle. Cette complexité se traduit par la difficulté d'évaluer de manière simple le ou les critères de performance du système ;
- Une complexité algorithmique. Par abus de langage, nous appelons complexité algorithmique la complexité des problèmes d'optimisation combinatoire. Cette complexité se traduit par la recherche de solution qui minimise un ou plusieurs critères de performance.

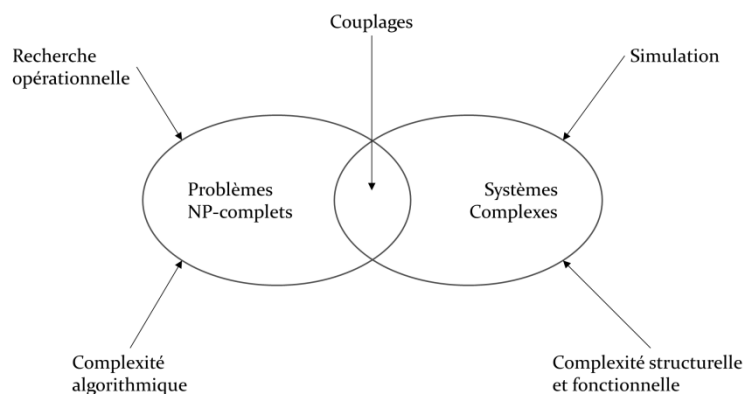


Figure 59 : La double complexité (Grangeon, 2001)

Certains problèmes peuvent ne présenter qu'une seule complexité. Un problème de dimensionnement ou d'évaluation de règles de gestion dans un système complexe présente une complexité structurelle et fonctionnelle qui rend difficile l'évaluation de la performance.

Pour résoudre les problèmes liés à la complexité structurelle et fonctionnelle, on utilise des modèles pour l'évaluation des performances tels que des modèles de simulation à événements discrets, des

modèles markoviens, des modèles à réseaux de files d'attente,... Pour résoudre les problèmes liés à la complexité algorithmique, on utilise des méthodes de recherche opérationnelle telles que les procédures par séparation, les heuristiques, les métaheuristiques, ...

Afin de résoudre les problèmes liés à la double complexité, nous proposons de reprendre la notion de couplage. Depuis les années 90, des couplages entre une méthode d'optimisation et un modèle de simulation ont été proposés pour la résolution de problèmes d'ordonnancement. Le modèle de simulation est utilisé pour évaluer chaque solution en donnant la valeur de chaque critère de performance. Le couplage permet de déterminer des solutions satisfaisantes et de prendre en compte des contraintes complexes.

L'objectif est de proposer un outil d'aide à la décision qui permette de répartir les activités pour un jour donné entre les chauffeurs et d'ordonnancer ces activités tout en respectant les contraintes de précedence, 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 chauffeur. Une solution correspond à :

- une affectation des activités de transport aux chauffeurs (*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.

Nous avons vu qu'il existait deux type de métaheuristique : les métaheuristiques basées individu (recherche locale,..) et des métaheuristiques basées population (algorithme génétique). Ces dernières sont très gourmandes en mémoire (génération de nombreux individus pour la construction de la population) et les opérateurs de croisement perturbent énormément les solutions. Dans notre problème, nous avons des solutions délicates à construire de par les contraintes de précedence entre activités de transport à prendre en compte.

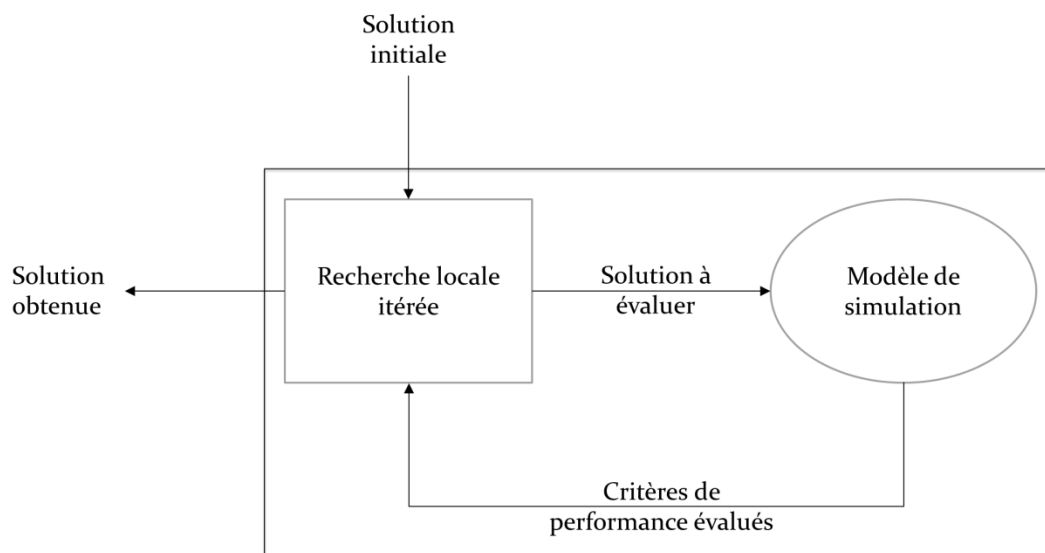


Figure 60 : Couplage Métaheuristique et modèle de simulation

Nous proposons donc un couplage métaheuristique basée individu - modèle de simulation comme le montre la Figure 60. 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'ordonnancement.

Une solution est une affectation et un ordonnancement des activités aux chauffeurs. La recherche locale itérée perturbe une solution initiale et la solution obtenue (nouvel ordonnancement et nouvelle affectation) est évaluée par le modèle de simulation. Ainsi, le modèle simulation évalue les cri-

tères 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.

Nous proposons d'utiliser une métaheuristique qui construit, pour un nombre donné de chauffeurs et leurs plannings et un nombre donné d'activités de transport, un ordonnancement correct. Un ordonnancement est appelé réalisable si :

- Toutes les activités sont réalisées. Des activités ne sont pas réalisées lorsqu'une ressource nécessaire n'est pas disponible ou que la contrainte de précédence n'est pas respectée (correspond au nombre de clients servis, dans la littérature) ;
- Le nombre d'heures supplémentaires n'excède pas 10 minutes pour chaque chauffeur. Un chauffeur a des heures supplémentaires quand il travaille encore après la fin de son planning ;
- Les retards sont raisonnables (en fonction de l'activité). Une activité est en retard lorsque la quatrième étape se termine après la date de fin souhaitée.

4.2. Métaheuristiques

Dans notre approche, nous avons utilisé deux métaheuristiques différentes : une recherche locale et une recherche locale itérée.

4.2.1. Recherche locale

La Figure 61 donne le principe de la méthode. La solution initiale est générée aléatoirement tout en respectant les contraintes de précédence.

1. σ : solution courante
2. **Tant que** le critère d'arrêt n'est pas atteint **Faire**
3. Choisir uniformément et aléatoirement σ' dans le système de voisinage de σ
4. **Si** $H(\sigma') \leq H(\sigma)$ **Alors**
5. $\sigma \leftarrow \sigma'$
6. **Fin si**
7. **Fin tant que**

Figure 61 : Principe de la recherche locale

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

4.2.2. Recherche locale itérée

La Figure 62 donne le principe de la méthode. La solution initiale est générée aléatoirement tout en respectant les contraintes de précédence.

```

1. A : nombre maximal d'itérations sans amélioration avant un saut
2. c : nombre d'itérations sans amélioration
3.  $\sigma^*$  : solution record (meilleure solution obtenue)
4.  $\sigma$  : solution courante
5.  $\sigma^* \leftarrow \sigma$ 
6. Tant que le critère d'arrêt n'est pas atteint Faire
7.   Si  $c < A$  Alors
8.     Choisir uniformément et aléatoirement  $\sigma'$  dans le système de voisinage de  $\sigma$ 
9.     Si  $H(\sigma') \leq H(\sigma)$  Alors
10.       $c \leftarrow 0$ 
11.       $\sigma \leftarrow \sigma'$ 
12.      Si  $H(\sigma) < H(\sigma^*)$  Alors
13.         $\sigma^* \leftarrow \sigma$ 
14.      Fin si
15.    Fin si
16.  Sinon
17.    Appliquer plusieurs fois le système de voisinage sur  $\sigma$ 
18.    Si  $H(\sigma') \neq H(\sigma)$  alors
19.      Si  $H(\sigma') < H(\sigma^*)$  alors
20.         $\sigma^* \leftarrow \sigma'$ 
21.      Fin si
22.       $c \leftarrow 0$ 
23.    Fin si
24.     $\sigma \leftarrow \sigma'$ 
25.  Fin si
26.   $c \leftarrow c + 1$ 
27. Fin tant que

```

Figure 62 : Principe de la recherche locale itérée

La méthode de la recherche locale itérée consiste à effectuer plusieurs descentes successives. Chaque descente est basée sur le système de voisinage décrit dans le paragraphe 4.2.5. À la fin de chaque descente, nous obtenons une solution d'assez bonne qualité. La particularité de la recherche locale itérée consiste à se servir de cette solution obtenue comme point de départ d'une nouvelle descente. Ainsi, la solution finale obtenue lors de la descente est légèrement modifiée pour devenir solution initiale de la descente suivante. Nous avons sélectionné différents systèmes de voisinage (insertion et permutation) que nous détaillons dans la section suivante.

4.2.3. 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 : $\sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{2M}\}$ où σ_j est la séquence des activités affectées aux plages de travail j , $j = 1, 2M$, $\sigma_j = \{\sigma_{1,j}, \sigma_{2,j}, \dots, \sigma_{Nb_j,j}\}$ où Nb_j est le nombre d'activités affectées à une plage de travail j , $j = 1, 2M$ tel que $\sum_{j=1}^{2M} Nb_j = N$.

$$\sigma \left\{ \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline \sigma_1 & 1 & 4 & 5 & 7 & 2 \\ \hline \sigma_2 & 8 & 9 & 3 & 6 & 10 \\ \hline \end{array} \right.$$

Figure 63 : Exemple d'affectation d'activités de transport aux chauffeurs

La Figure 63 montre la manière dont nous avons affecté des activités de transports à deux périodes de travail σ_1 et σ_2 . Nous souhaitons évaluer le nombre de solutions possibles pour un nombre donné

d'activités de transport et un nombre donné de plages de travail. Nous définissons l'ensemble S des solutions possibles. Un élément de S est la concaténation de tous les vecteurs σ_j . Un séparateur permet de distinguer les différentes plages de travail (Figure 64).

1	4	5	7	2	8	...	10	...
---	---	---	---	---	---	-----	----	-----

Figure 64 : vecteur solution

Sous cette forme, nous pouvons construire $N!$ vecteurs différents à partir de l'ensemble N des activités de transport à réaliser. Ensuite, les séparateurs peuvent être placés n'importe où dans ce vecteur solution, soit C_{N+1}^{M-1} positionnements possibles. Par conséquent le nombre total de solutions possibles est évalué de la manière suivante :

$$card(S) = C_{N+1}^{M-1} \times N!$$

4.2.4. Critères de performance

Chaque solution est évaluée selon trois critères :

- $H1(\sigma)$ les activités non réalisées : ce critère pénalise chaque activité non réalisée qui est considérée comme étant livrée le lendemain, soit un retard de 24h, nous avons identifié deux cas de figure :
 - Aucune date de début de l'étape 1 n'a pu être déterminée par manque d'au moins une ressource (aucun contenant disponible ou ligne de production demandée en dehors du planning d'ouverture) ;
 - Aucune date de début de l'étape 4 n'a pu être déterminée car l'aire de nettoyage est demandée en dehors du planning d'ouverture ;

Le critère est alors évalué de la manière suivante : $H_1(\sigma) = \text{Nombre d'activité non réalisée} \times (24 \times 60)^2$;

- $H2(\sigma)$ la somme des carrés des retards (exprimée en minutes) : le retard est obtenu par la différence entre la date de livraison souhaitée (l_i) et la date de fin de l'étape 4 de l'activité i observée ($F_{i,4}$) ;

$$H_2(\sigma) = \sum_{i \in N} (\max(F_{i,4} - l_i; 0))^2$$

- $H3(\sigma)$ la somme des carrés du nombre d'heures supplémentaires (exprimée en minutes) : le nombre d'heures supplémentaires correspond à la différence entre la date de fin théorique du travail des chauffeurs travaillant selon la plage de travail j (T_j) et la date de fin de la dernière étape de la dernière activité affectée à la plage de travail j ($F_{Nb_j,5}$).

$$H_3(\sigma) = \sum_{j=1}^{2M} (\max(F_{Nb_j,5} - T_j; 0))^2$$

Les critères concernant les retards et le nombre d'heures supplémentaires sont élevés au carré car notre objectif est de lisser l'impact des retards sur plusieurs activités ou des heures supplémentaires pour plusieurs chauffeurs. Il est préférable d'avoir des chauffeurs avec un faible nombre d'heures supplémentaires que quelques chauffeurs avec beaucoup d'heures supplémentaires, de même pour le retard des activités de transport.

Les trois critères peuvent être priorisés comme suit :

$$H(\sigma) = H1(\sigma) + \alpha_1 H2(\sigma) + \alpha_2 H3(\sigma)$$

Avec α_1 et α_2 choisis en fonction de l'importance accordée par le décideur aux critères $H2(\sigma)$ et $H3(\sigma)$.

4.2.5. Système de voisinage

Ces systèmes reprennent les principes des systèmes SPI, SBR et WRI, la différence réside dans le déplacement de l'activité complète et non dans le déplacement de nœuds (origine/destination). Nous n'avons pas repris les solutions MN, SN et CN car compte tenu des nombreuses fenêtres de temps, il nous semble trop perturber la solution. Nous avons choisi deux systèmes de voisinage : l'insertion et la permutation. Nous allons décrire le principe de chaque système.

4.2.5.1. Insertion

Le système de voisinage consiste à déplacer une activité à une nouvelle position soit dans la liste des activités affectées au même poste de travail soit dans la liste des activités affectées à une autre poste de travail, tout en respectant les contraintes de précédence. L'algorithme de principe du système de voisinage est donné dans la Figure 65.

1. Choisir aléatoirement et uniformément une plage de travail $j_1, j_1 \in \{1, 2M\}$
2. Choisir aléatoirement et uniformément une plage de travail $j_2, j_2 \in \{1, 2M\}$ (j_1 peut être égal à j_2)
3. Choisir aléatoirement et uniformément une position $i_1, i_1 \in \{1, Nb_{j_1}\}$
4. Soit $a = \sigma_{i_1 j_1}$, l'activité à la position i_1 dans la liste des activités σ_{j_1} d'une plage de travail j_1
5. Supprimer l'activité a de σ_{j_1}
6. Choisir aléatoirement et uniformément une position $i_2, i_2 \in \{1, Nb_{j_2}\}$ (si $j_1 = j_2$ alors $i_2 \neq i_1$) qui vérifie la contrainte de précédence entre les activités.
7. Insérer a à la position i_2 dans la liste des activités σ_{j_2} d'une plage de travail j_2

Figure 65 : Principe du système de voisinage insertion

Les mouvements que nous autorisons sont de deux types :

- Les mouvements intra-tournée : il s'agit de déplacer une activité dans le vecteur affecté à la même plage de travail (Figure 66) 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 67).

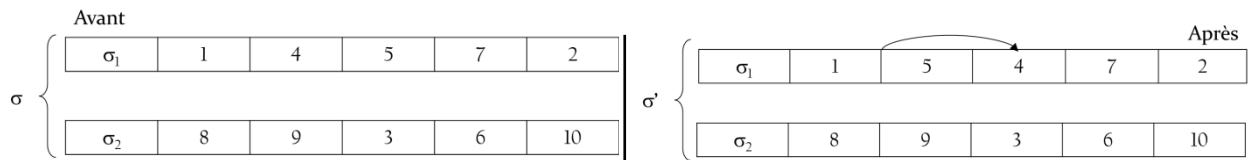


Figure 66 : Mouvement intra-tournées

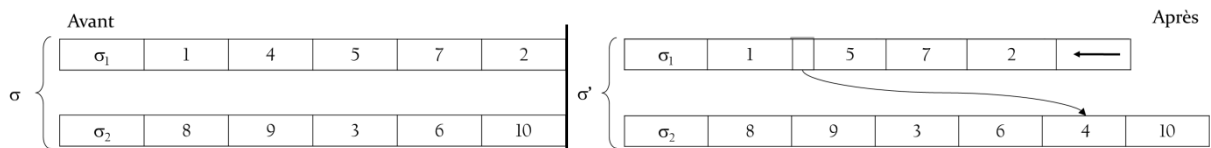


Figure 67 : Mouvement inter-tournées

Nous n'avons pas retenu les systèmes de voisinage proposés par (Parragh S. , 2009), car, compte tenu de nos nombreuses fenêtres de temps et contraintes de précédence, ceux-ci perturbent trop les solutions.

4.2.5.2. Permutation

Le système de voisinage consiste à permuter deux activités entre elles, ces deux activités appartenant soit à la liste des activités affectées au même plage de travail soit à la liste des activités affectées à un autre plage de travail différente, tout en respectant les contraintes de précédence. L'algorithme de principe du système de voisinage est donné dans la Figure 68.

1. Choisir aléatoirement et uniformément une plage de travail $j_1, j_1 \in \{1, 2M\}$
2. Choisir aléatoirement et uniformément une plage de travail $j_2, j_2 \in \{1, 2M\}$ (j_1 peut être égal à j_2)
3. Choisir aléatoirement et uniformément une position $i_1, i_1 \in \{1, Nb_{j_1}\}$
4. Soit $a = \sigma_{i_1 j_1}$, l'activité à la position i_1 dans la liste des activités σ_{j_1} d'une plage de travail j_1
5. Choisir aléatoirement et uniformément une position $i_2, i_2 \in \{1, Nb_{j_2}\}$ (si $j_1 = j_2$ alors $i_2 \neq i_1$) qui vérifie la contrainte de précédence entre les activités.
6. Soit $b = \sigma_{i_2 j_2}$, l'activité à la position i_2 dans la liste des activités σ_{j_2} d'une plage de travail j_2
7. Permuter a et b

Figure 68 : Principe du système de voisinage permutation

Les mouvements que nous autorisons sont de deux types :

- Les mouvements intra-tournée : il s'agit de permuter deux activités dans le vecteur affecté à la même plage de travail (Figure 69) ;
- Les mouvements inter-tournées : il s'agit de permuter deux activités appartenant à deux vecteurs différents, représentant deux plages de travail distinctes (Figure 70).

Tous ces déplacements sont effectués en veillant à respecter les contraintes de précédence entre les activités.

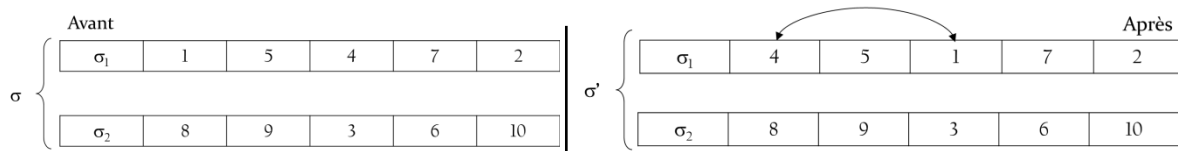


Figure 69 : Mouvement intra-tournées

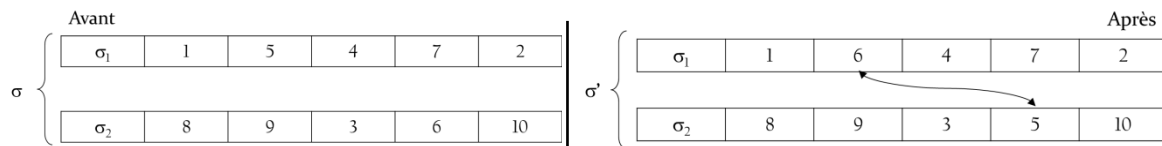


Figure 70 : Mouvement inter-tournées

Pour utiliser la permutation, nous sommes contraints de l'utiliser en association avec l'insertion. En effet, lorsque nous construisons une solution initiale, certains chauffeurs n'ont aucune activité de transport à réaliser, alors que d'autres en ont trop. La permutation ne permet pas de déplacer une activité simplement puisqu'il faut faire un échange avec une autre. Par conséquent, nous proposons d'utiliser chaque système de voisinage avec une probabilité de 0,5. Ce nouveau système de voisinage est appelé insertion-permutation.

Afin de construire des solutions où les activités sont réparties entre les différents chauffeurs disponibles, nous avons construits un modèle de simulation.

4.3. Modèle de simulation

Pour prendre en compte la complexité fonctionnelle et structurelle, nous proposons d'utiliser un modèle de simulation. Deux modèles de simulation ont été construits : le premier en utilisant le logiciel de simulation Witness®, le second dans le langage de programmation Java.

La Figure 71 donne un extrait des données en entrée des deux modèles de simulation. Pour chaque activité, nous donnons, en entrée, le type d'activité (distribution de contenant propre (DCP) ou transport d'un contenant sale (RCS)), l'origine, la destination, la date de début au plus tôt, le type de véhicule, la date de fin souhaitée. A 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'un DCP, une aire de nettoyage, dans le cas d'un RCS. 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 plage de travail, nous affectons une liste d'activités à réaliser.

Caractéristiques des activités

No	Activité	Origine	Destination	Date de début au plus tard	Type de véhicule	Date de fin souhaitée	Préd.	Plages de travail	
...	...	...	...	...	...	...	...	1	2
49	DCP	Blanch.	HE	6:30	Ca_Norm	14:30		6:00	12:30
50	RCS	HE	CPU	13:00	Ca_Frigo		25	12:00	14:00
51	RCS	GM	CPU	13:00	Ca_Iso_gd		26	Affectation	
52	RCS	GM	CPU	13:00	Ca_Iso_gd		27	52	49
53	RCS	HE	CPU	13:00	Ca_Frigo		28	50	55
54	RCS	GM	CPU	13:00	Ca_Iso_gd		29	53	
55	RCS	Clem	Blanch.	13:30	Ca_Norm			51	
...	...	...	...	...	...	...	...	54	

Figure 71 : Les données en entrée du modèle de simulation

Dans cet exemple, un chauffeur qui travaille de 6h à 12h devra effectuer les activités de transport dans l'ordre suivant : 52, 50, 53, 51, 54.

Chaque chauffeur doit réaliser les activités dans l'ordre dans lequel elles lui sont affectées. Une activité ne peut commencer que lorsque :

- Les ressources nécessaires à son traitement sont disponibles ;
- La date de début au plus tôt est atteinte ;
- Toutes les activités qui la précèdent dans la liste des activités affectées au chauffeur, sont réalisées ;
- Les contraintes de précédence sont respectées.

La liste des activités affectée à un chauffeur ne peut être remise en question.

4.3.1. Le modèle de simulation Witness

Présentation du logiciel

Witness est un logiciel de simulation dirigés par événements discrets. Witness requiert dans un premier temps de modéliser le système à étudier. Il s'agit de déposer des machines, des stocks, etc. dans une interface graphique, puis de décrire leurs lois de fonctionnement et leurs interactions. Des articles sont ensuite décrits et envoyés dans le système. Leur cheminement à travers le modèle est paramétré au préalable. Witness autorise les échanges avec les fichiers Excel : ceux-ci sont utilisés pour alimenter et paramétrer les modèles de simulation.

Tout ce qui est utilisé dans un modèle Witness est appelé élément (que ce soit une machine, un attribut, un histogramme, etc.) Witness possède principalement quatre éléments de base : les articles, les stocks, les opérateurs et les machines.

Les **articles** circulent à travers le modèle. Ils peuvent représenter des composants physiques, des informations au sein d'une entreprise ou même des personnes dans un supermarché. L'outil permet de paramétrer les caractéristiques des articles. Grâce à la programmation de l'article, nous pouvons paramétrer et régler l'arrivée des articles dans le modèle, leur quantité et leur destination.

Leur point d'entrée dans le modèle est indiqué dans une loi appelée « Loi d'entrée ». Ils peuvent être définis par une série d'attributs permettant de les identifier.

Les **stocks** sont des éléments spécifiques où les articles peuvent être mis en attente. Nous pouvons représenter différents systèmes de file d'attente, telles que : des personnes dans une file d'attente ou des moteurs sur une étagère, des pièces en attente d'usinage. Un article reste dans un stock jusqu'à ce qu'il soit pris en charge par un autre élément. Les articles peuvent être ordonnés dans le stock suivant plusieurs règles de gestion, telles que : FIFO, LIFO, SPT.

Les **ressources** sont symbolisées par des opérateurs qui peuvent représenter des outils, des agents, ... Ces ressources peuvent être utilisées lors du fonctionnement d'une machine, le réglage d'une machine, ou pour la réparation d'une panne. Un planning peut leur être associé.

Les **machines** sont des éléments utilisés pour matérialiser tout ce qui prend en charge des articles, les traite et les envoie vers leurs prochaines destinations. Une organisation qui traite des informations, une perceuse, ou un atelier peuvent être assimilés à une machine. Les machines qui traitent un ou plusieurs articles à la fois peuvent être modélisées.

Un **module** est composé d'un ensemble d'éléments décrits précédemment, comportant un point d'entrée et un point de sortie. Un module permet de modéliser des processus autonomes dans un modèle. Par exemple, un atelier de peinture situé dans une usine est constitué par un grand nombre d'éléments. Il est possible de déclarer un module nommé ATELIER_PEINTURE contenant ces éléments. Ainsi, s'il est demandé d'évaluer l'impact de la mise en route d'un second atelier, il suffit de dupliquer ce module.

Modélisation du problème avec Witness

Ce logiciel sert essentiellement dans un contexte d'ateliers de production : article, stock, machine, opérateurs,... Cependant, nous avons utilisé cet outil pour construire un modèle de simulation pour l'organisation des transports. Nous avons conçu le modèle de simulation en représentant les différents éléments de notre problème, comme le montre le Tableau 39.

Éléments identifiés		Éléments Witness
Véhicule		Article
Contenant		Article
Activité		Article
Étapes		Machines
Chauffeur		Module
Site	Quai de chargement	Opérateur
	Quai de déchargement	Opérateur
	Ligne de production	Opérateur + Planning
	Aire de nettoyage	Opérateur + Planning

Tableau 39 : Modélisation du problème avec les éléments Witness

Nous avons choisi de modéliser les véhicules, les contenants et les activités de transport comme des articles, les chauffeurs sont représentés par des modules. Le choix que nous avons fait pour la modélisation des véhicules, des contenants et des activités comme des articles, se comprend par la facilité de paramétrage des articles dans le logiciel. En effet, pour chaque article, un fichier peut être créé en indiquant la valeur de chaque attribut (par exemple le type pour les véhicules). Ainsi, toute modification est rapidement prise en compte. Chaque chauffeur est représenté par un module composé de stocks, de machines, de variables et de planning. Les sites sont des modules composés d'opérateurs, c'est-à-dire de quais de chargement, de déchargement et éventuellement de ligne de production et d'aire de nettoyage. Nous avons illustré notre modèle de simulation dans la Figure 72.

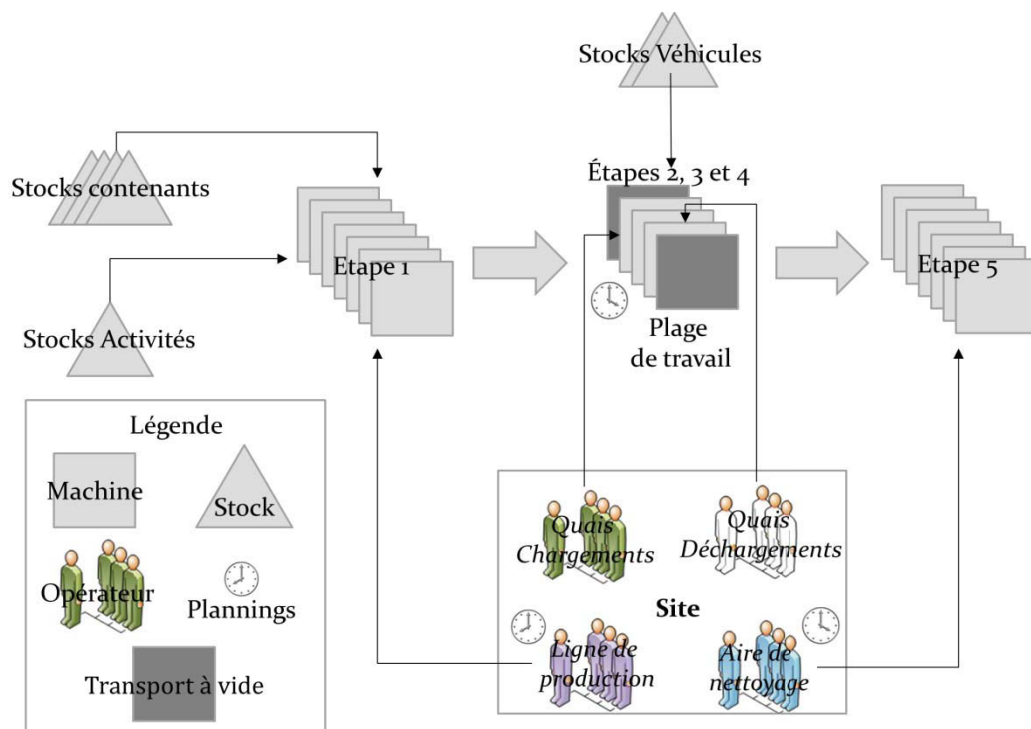


Figure 72 : Relations entre les entités du modèle Witness

La Figure 72 présente les différentes entités composantes du modèle :

- Les entités représentées par un article sont regroupées dans des stocks distincts (contenants, véhicules et activités) ;
- Les étapes 2, 3 et 4 sont identifiées par les carrés gris clair de l'entité « plage de travail » ;
- Les transports à vides sont représentés par des machines qui sont effectués avant la réalisation de l'étape de chargement ou après l'étape de déchargement ;
- Les horloges représentent les plannings auxquels sont soumis les lignes de production, les aires de nettoyage et les chauffeurs.

L'étape 1 est représentée par une machine qui utilise : une activité, un contenant d'un type donné et une ligne de production, dans le cas d'un DCP. À la fin du traitement de l'étape, la ressource ligne de production, dans le cas d'un DCP, est libérée. L'activité et le contenant sont envoyés dans un stock tampon au niveau du chauffeur.

Le chauffeur réalise les transports à vide éventuels et les étapes 2, 3 et 4 avec un véhicule. La liste des activités, que devra réaliser le chauffeur, est donnée en entrée et enregistrée dans une variable. Les durées des transports à vide avant le chargement ou après le chargement et les durées de transports entre les sites d'une activité sont données dans une matrice des durées de transport. Pour les étapes 2 et 4, une ressource supplémentaire est nécessaire : un quai de chargement, puis un quai de déchargement. Une fois l'ensemble des étapes réalisées, l'activité et le contenant sont envoyés à la machine « étape 5 ».

L'étape 4 est représentée par une machine qui nécessite éventuellement une aire de nettoyage, dans le cas d'un RCS. Une fois le traitement de l'étape achevé, l'activité est terminée.

Les activités sont traitées dans l'ordre des activités affectées à un chauffeur. Le traitement des étapes des activités de transport et des transports à vide ne peut être réalisé, si l'une des entités est indisponible. Pour chaque étape, les dates effectives de début et de fin sont inscrites dans un fichier résultats en indiquant les numéros de chaque ressource consommée.

Le modèle de simulation conçu avec ce logiciel a permis la validation de notre modélisation, mais n'a pu être utilisé dans le couplage car les durées d'exécution étaient trop longues.

4.3.2. Le modèle de simulation Java

Afin de pallier aux durées d'exécution, nous proposons un modèle de simulation dirigé par horloge dans un langage de programmation orienté objet.

À partir des données renseignées pour les activités et la liste des activités à réaliser pour chaque plage de travail, nous avons travaillé en 2 étapes :

- la construction de la liste des étapes déterminant les transports à vides et les ressources utilisées,
- le calcul des dates de début et de fin de chaque étape en prenant en compte l'utilisation des ressources.

4.3.2.1. Construction de la liste des étapes

Pour dérouler la simulation, un prétraitement permet de construire la liste complète des étapes à réaliser. Nous distinguons 13 types d'étape : les 5 étapes de distribution de contenant propre, les 5 étapes de retour de contenant sale et 3 étapes pour les transports à vide. Ces étapes sont décrites dans le Tableau 40.

Activité	Etape	Description
DCP	1	Remplissage du contenant
	2	Chargement du contenant au site de production
	3	Transport entre le site de production et le site de consommation
	4	Déchargement du contenant au site de production
	5	Consommation des produits mis à disposition dans le contenant
RCS	6	Ramassage du contenant après consommation
	7	Chargement du contenant au site de consommation
	8	Transport entre le site de consommation et le site de production
	9	Déchargement au site de production
	10	Nettoyage du contenant
Transport à vide	11	Transport à vide entre le dépôt et l'origine d'une activité
	12	Transport à vide entre deux sites
	13	Transport à vide entre la destination d'une activité et le dépôt

Tableau 40 : Identification des étapes

Ces étapes sont reliées par des contraintes de précédence que nous illustrons par des exemples.

Cas 1 : première activité de la plage de travail, un transport à vide (étape 11) doit précéder l'étape 2, si c'est un DCP, ou l'étape 7 si c'est un RCS.

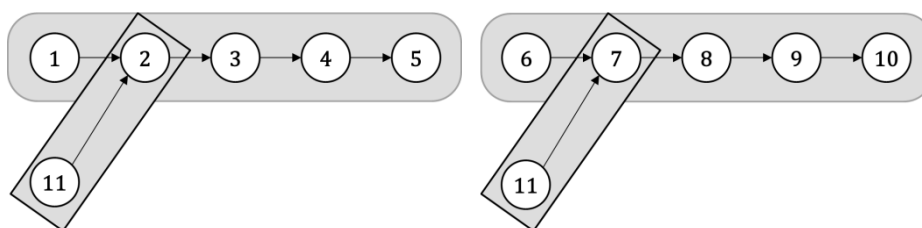


Figure 73 : transport à vide avant la première activité

Cas 2 : dernière activité affectée à la plage de travail, un transport à vide (étape 13), doit succéder à l'étape 4, si c'est un DCP, ou l'étape 9, si c'est un RCS.

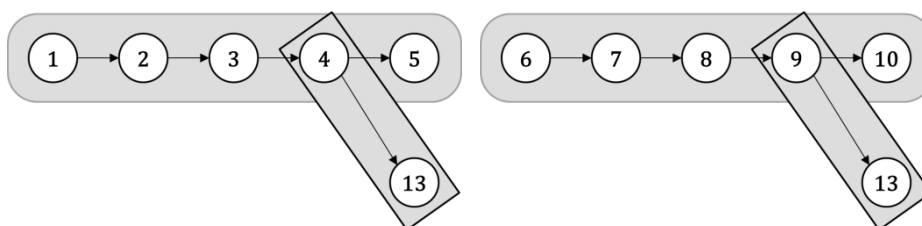


Figure 74 : transport à vide à la fin de la plage de travail

Cas 3 : l'origine de l'activité suivante est identique à la destination de l'activité précédente dans une même plage horaire et nécessite le même type de véhicule, aucun transport à vide n'est effectué. Deux cas sont possibles selon que la première activité est un DCP ou un RCS :

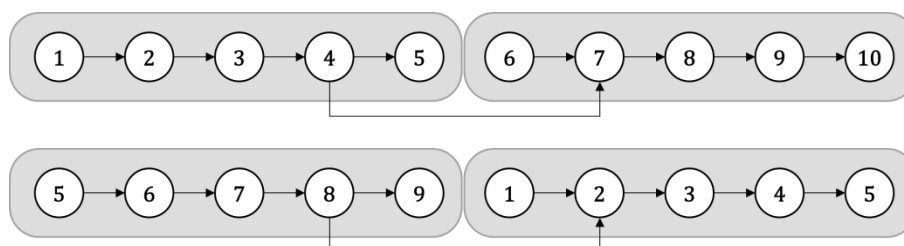


Figure 75 : transport direct entre deux sites

Cas 4 : l'origine de l'activité suivante est différente de la destination de l'activité précédente mais les véhicules sont identiques. Un transport à vide est effectué. Par exemple :

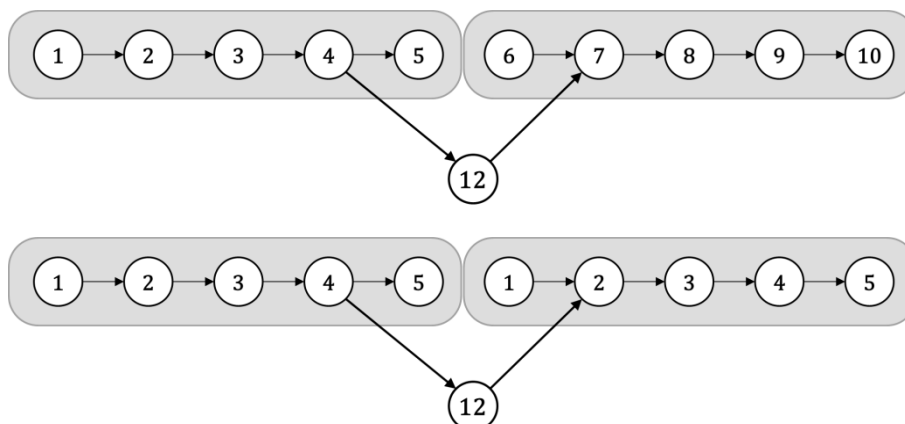


Figure 76 : transport à vide entre deux activités

Cas 5 : les véhicules nécessaires sont différents, des transports à vide sont réalisés pour changer de véhicules. Par exemple :

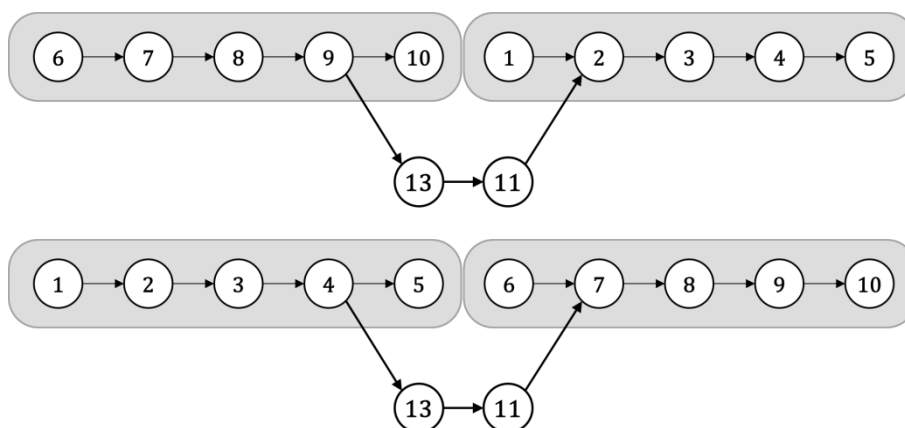


Figure 77 : transports à vide pour changer de véhicules

Cas 6 : deux activités sont liées par une contrainte de précédence.

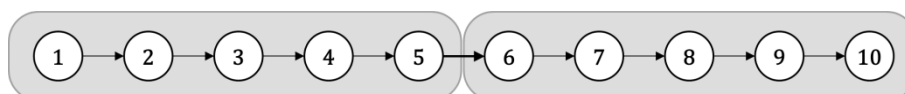


Figure 78 : contrainte de précédence entre deux activités

À partir de la liste d'activités affectées à chaque plage de travail, nous pouvons déduire les étapes correspondant aux transports à vide et toutes les contraintes de précédence entre toutes les étapes. L'ensemble des contraintes de précédence constitue un graphe de précédence qui permet d'évaluer pour chaque étape sa date de début au plus tôt. La liste des étapes est ordonnée selon les dates de début au plus tôt croissantes.

Le Tableau 41 reprend les ressources nécessaires pour chaque étape.

Étape	DCP	Étape	RCS
1	Ligne de production, Contenant	6	Contenant
2	Contenant, Quai de chargement, Véhicule, Chauffeur	7	Contenant, Quai de chargement, Véhicule, Chauffeur
3	Contenant, Véhicule, Chauffeur	8	Contenant, Véhicule, Chauffeur
4	Contenant, Quai de déchargement Véhicule, Chauffeur	9	Contenant, Quai de déchargement Véhicule, Chauffeur
5	Contenant	10	Contenant, Aire de nettoyage
Transports à vide			
11	Véhicule, Chauffeur		
12	Véhicule, Chauffeur		
13	Véhicule, Chauffeur		

Tableau 41 : Utilisation des ressources pour chaque étape

Les étapes ne peuvent être réalisées que si l'ensemble des ressources nécessaires sont disponibles. Dans le cas où une des ressources n'est pas disponible, les autres ressources nécessaires à cette étape sont en attente (elles ne peuvent pas effectuer une autre étape).

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.

4.3.2.2. Calcul des dates de début et de fin de chaque étape

Le calcul des dates de début et de fin des étapes est réalisé selon le principe général donné par la Figure 79.

```

1.   $t = 0$ 
2.  Tant que  $t < T$  Faire
3.      Pour chaque étape  $k$  non réalisée de la liste des étapes faire
4.          Si date de début au plus tôt de l'étape  $k = t$  alors
5.              Si les ressources nécessaires sont disponibles alors
6.                  Réaliser l'étape  $k$  (calcul de la date de fin, réservation des ressources)
7.              Sinon
8.                  Réserver les ressources nécessaires qui sont disponibles
9.                  Incrémenter la date au plus tôt de l'étape  $k$ 
10.             Fin si
11.         Fin si
12.     Fin pour
13.      $t \leftarrow t + 1$ 
14. Fin tant que

```

Figure 79 : principe de calcul des dates de début et de fin des étapes

La Figure 80 détaille le principe dans le cas d'une étape 1 pour laquelle on cherche à déterminer si elle est réalisable à la date t . Pour l'ensemble des étapes, voir Annexe 1 p. 171.

1. Rechercher une ligne de production l compatible et disponible
2. Rechercher un contenant c compatible et disponible
3. **Si** $l \neq 0$ **et** $c \neq 0$ **alors**
4. Date de fin de l'étape = date de début de l'étape + durée de l'étape
5. Date de début au plus tôt de l'étape suivante = date de fin de l'étape
6. Indiquer que la ligne l est occupée de la date de début à la date de fin de l'étape
7. Indiquer que le contenant c est occupé de la date de début à la date de fin de l'étape
8. **Sinon**
9. Date de début au plus tôt de l'étape = Date de début au plus tôt de l'étape + 1
10. **Si** $l \neq 0$ **alors**
11. Indiquer que la ligne l est réservée jusqu'à la date de début au plus tôt
12. **Sinon**
13. **Si** $c \neq 0$ **alors**
14. Indiquer que le contenant c est réservé jusqu'à la date de début au plus tôt
15. **Fin si**
16. **Fin si**
17. **Fin si**

Figure 8o : Algorithme de l'étape 1 (remplissage)

À partir de la date de fin des étapes, nous pouvons déduire les dates de fin des activités, leur retard, les dates de fin de travail des chauffeurs, leurs heures supplémentaires et à partir des occupations/réservations des ressources, les attentes aux quais de chargement et aux quais de déchargement. Le premier modèle de simulation a été utilisé pour valider le second. Nous avons évalué le temps d'exécution des deux modèles de simulation pour 70 activités : 7 secondes pour Witness et moins d'une seconde pour java (instantané). Ce gain de temps nous a permis de mettre en place le couplage métaheuristique – modèle de simulation avec le second modèle.

5. Mise en œuvre et résultats

Cette partie présente les résultats obtenus pour la réorganisation des activités de transport au sein du CHU. 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 du chu (déménagements, construction, transferts,...).

5.1. 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.

5.1.1. 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.

5.1.1.1. 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 42 présente les résultats obtenus avec :

- La méthode exacte (programme linéaire) présentée dans le chapitre précédent ;
- Les résultats obtenus avec notre couplage (recherche locale) proposé dans ce chapitre.

M est le nombre de postes, le nombre de plage de travail est égal à $2M$. H_2' est la somme des retards, exprimé en minutes, et H_3' 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 H_2'	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 42 : 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.

5.1.1.2. 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 plannings de travail. Nous rappelons que les chauffeurs peuvent travailler selon des plannings 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 avons choisi $\alpha_1 = 50$, $\alpha_2 = 50$.

Scénarii	N	M	Nombre d'activités non réalisées	Retard total H_2'	Nombre d'activités avec du retard	Nombre d'heures supplémentaires H_3'	Nombre de périodes de travail avec heure supplémentaire
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 43 : 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'heure supplémentaire, la solution avec 4,5 plannings (soit 9 périodes de travail) a été choisie par le CHU 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 plannings (17 plages de travail), ce qui correspond aux 4 plannings 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 le CHU.

5.1.2. 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 44 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 d'itérations. Pour les résultats obtenus dans le Tableau 44a, les valeurs des coefficients sont $\alpha_1 = 100, \alpha_2 = 1$ et dans le Tableau 44b $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 100$.

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

Tableau 44a

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

Tableau 44b

Tableau 44 : Résultats pour le transport de différents types de produits

Pour chaque scénario, nous avons donné les solutions sur lesquelles nous avons travaillé avec les responsables du CHU. Chacune des solutions présentées correspond à la solution validée par les responsables. Les deux méthodes permettent d'obtenir des solutions faisables dans la plupart des cas. Ainsi, nous obtenons une solution avec 8 chauffeurs et 7 chauffeurs que nous ne pouvions pas obtenir avec des chauffeurs dédiés. Les responsables du CHU 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.

5.2. Résultats pour l'ensemble des modifications du CHU

Nous avons repris l'ensemble des phases de réorganisation, qui ont été présentées dans le chapitre 1. 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 du CHU.

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.

Étant donné le comportement stochastique du couplage proposé, nous avons réalisé cinq répliques de la méthode. Pour chaque instance, pour chaque système de voisinage et chaque réplique, le nombre d'itérations est 2 000 000 et le critère de saut est fixé à 30 000. Les différents échanges avec les responsables du CHU nous ont permis de définir la pondération des critères de la manière suivante : $\alpha_1 = 100, \alpha_2 = 1$, ce qui signifie que l'importance est donnée à la minimisation des retards.

Pour chaque instance nous donnons :

- N : le nombre d'activités ;
- M : le nombre de chauffeurs ;
- %SR : le pourcentage de solutions réalisables obtenues, nous indiquons par solutions réalisables, les solutions qui permettent de réaliser l'ensemble des activités avec un retard maximum de 10 minutes et 5 minutes d'heures supplémentaires par chauffeurs ;
- La moyenne, l'écart-type, le minimum et le maximum de la somme des retards exprimés en minutes ;
- La moyenne, l'écart-type, le minimum et le maximum de la somme des heures supplémentaires exprimées en minutes.

5.2.1. Chauffeurs dédiés

Dans le Tableau 45 et le Tableau 46, les lignes grisées correspondent aux instances concernant les transports de repas avec les véhicules réfrigérés et les lignes en blanc concernent les transports de linge et de médicaments qui ont été considérées conjointement car ces activités utilisent le même type de véhicule.

Le Tableau 45 donne les résultats obtenus avec le système de voisinage insertion. Le Tableau 46 donne les résultats obtenus avec le système de voisinage insertion-permutation.

Phase CHU	Inst.	N	M	%SR	Retard				H. Supp.			
					Moy	σ	Min	Max	Moy	σ	Min	Max
1	1	12	2	100%	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	31	5	0%	35	0	35	35	0	0	0	0
	3	32	5	0%	35	0	35	35	1	2	0	5
	4	33	6	0%	35	0	35	35	0	0	0	0
2	8	22	4	100%	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	39	7	0%	60	0	60	60	0	0	0	0
	10	41	7	0%	35	0	35	35	15	7	5	25
	11	39	7	0%	35	0	35	35	24	17	0	50
3	15	22	4	100%	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	22	3	0%	0	0	0	0	145	0	145	145
	17	24	4	80%	1	2	0	5	5	10	0	25
	18	40	5	0%	36	2	35	40	147	30	110	195
	19	42	5	0%	40	0	40	40	229	49	175	305
	20	40	5	0%	36	2	35	40	97	25	50	125
4	24	16	3	100%	0	0	0	0	0	0	0	0
5	28	28	4	100%	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 45 : Résultats obtenus avec des chauffeurs dédiés avec le premier système de voisinage insertion

Phase CHU	Inst.	N	M	%SR	Retard				H. Supp			
					Moy	σ	Min	Max	Moy	σ	Min	Max
1	1	12	2	100%	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	31	5	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
	3	32	5	0%	35	0	35	35	0	0	0	0
	4	33	6	0%	35	0	35	35	0	0	0	0
2	8	22	4	100%	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	39	7	0%	60	0	60	60	0	0	0	0
	10	41	7	0%	35	0	35	35	0	0	0	0
	11	39	7	0%	35	0	35	35	0	0	0	0
3	15	22	4	100%	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	22	3	0%	5	0	5	5	50	0	50	50
	17	24	4	100%	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	40	5	0%	35	0	35	35	2	2	0	5
	19	42	5	0%	40	0	40	40	84	7	75	95
	20	40	5	0%	35	0	35	35	20	6	10	25
4	24	16	3	100%	0	0	0	0	0	0	0	0
5	28	28	4	100%	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 46 : Résultats obtenus avec des chauffeurs dédiés avec le système de voisinage insertion permutation

Pour le système de voisinage insertion, nous obtenons une solution réalisable pour cinq instances concernant les repas, contre six instances pour le système de voisinage insertion-permutation. L'instance 16 contient les mêmes activités que l'instance 15, mais correspond à une organisation

souhaitée avec 1 chauffeur de moins pour laquelle, malheureusement, aucune solution réalisable n'est obtenue pour les deux systèmes de voisinage. Pour les instances linge et médicaments nous obtenons 100% de solutions réalisables seulement pour l'instance 2 et le système de voisinage insertion-permutation. Le système de voisinage insertion-permutation améliore sensiblement les retards et de façon plus significative les heures supplémentaires.

5.2.2. Chauffeurs polyvalents

Les instances concernant les chauffeurs polyvalents ont été construites à partir de celles pour les chauffeurs dédiés. Ainsi, l'instance notée $Z(X+Y)$ désigne l'instance qui contient les activités des instances X et Y données pour les chauffeurs dédiés.

Le Tableau 47 donne les résultats obtenus avec le système de voisinage insertion. Le Tableau 48 donne les résultats obtenus avec le système Insertion-Permutation.

Phase CHU	Inst.	N	M	%SR	Retard				H. Supp			
					Moy	σ	Min	Max	Moy	σ	Min	Max
1	5(1+2)	43	7	0%	35	0	35	35	0	0	0	0
	6(1+3)	44	7	0%	60	0	60	60	7	9	0	20
	7(1+4)	45	7	0%	60	0	60	60	0	0	0	0
2	12(8+9)	61	9	40%	21	12	10	35	78	122	0	315
	13(8+10)	63	9	20%	23	12	10	40	83	72	0	195
	14(8+11)	61	9	20%	16	9	10	40	17	28	0	85
3	21(15+18)	62	9	0%	114	45	40	225	62	96	0	270
	22(15+19)	64	9	0%	27	9	20	40	70	116	0	300
	23(15+20)	62	9	80%	14	10	10	45	4	10	0	35
4	25(24+18)	56	8	0%	35	0	35	35	20	19	0	55
	26(24+19)	58	8	0%	45	10	40	70	132	132	0	300
	27(24+20)	56	8	0%	35	0	35	35	34	32	0	80
5	29(28+18)	68	9	20%	35	20	10	80	109	122	0	365
	30(28+19)	70	9	0%	96	78	10	240	136	107	0	365

Tableau 47 : Résultats obtenus avec des chauffeurs polyvalents avec le système de voisinage insertion

Phase CHU	Inst.	N	M	%SR	Retard				H. Supp			
					Moy	ET	Min	Max	Moy	ET	Min	Max
1	5(1+2)	43	7	0%	35	0	35	35	0	0	0	0
	6(1+3)	44	7	0%	60	0	60	60	0	0	0	0
	7(1+4)	45	7	0%	60	0	60	60	0	0	0	0
2	12(8+9)	61	9	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
	13(8+10)	63	9	60%	16	10	10	35	12	24	0	60
	14(8+11)	61	9	60%	10	0	10	10	0	0	0	0
3	21(15+18)	62	9	0%	30	23	15	75	6	12	0	30
	22(15+19)	64	9	0%	17	2	15	20	0	0	0	0
	23(15+20)	62	9	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
4	25(24+18)	56	8	0%	35	0	35	35	0	0	0	0
	26(24+19)	58	8	0%	40	0	40	40	0	0	0	0
	27(24+20)	56	8	0%	35	0	35	35	0	0	0	0
5	29(28+18)	68	9	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
	30(28+19)	70	9	0%	40	0	40	40	2	4	0	10

Tableau 48 : Résultats obtenus avec des chauffeurs polyvalents avec le système de voisinage insertion permutation

Avec les deux systèmes de voisinage, nous obtenons peu de solutions réalisables : seulement 5 instances (12, 13, 14, 23 et 29) sur les 14. Nous constatons toutefois que le nombre de solutions réalisables augmentent 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 des chauffeurs, nous avons repris des instances pour lesquelles aucune solution réalisable n'avait été obtenue avec les plannings proposés par le CHU et avons mise en œuvre notre méthode avec d'autres plannings.

5.3. Étude préliminaire du choix des plannings

Nous donnons dans cette partie les résultats concernant l'instance 21. Les plannings de travail initialement proposés par les responsables étaient les suivants :

- (1) de 6h à 11h30 puis de 12h à 14h,
- (2) de 6h30 à 12h puis de 12h30 à 14h30,
- (3) de 7h à 12h puis de 12h30 à 15h,
- (4) de 9h à 12h puis de 12h30 à 16h,
- (5) de 10h à 12h30 puis de 13h à 18h,
- (6) de 10h à 13h puis de 13h30 à 18h.

Pour cette instance, ils avaient affecté 1 chauffeur aux plannings 1 et 2, 2 chauffeurs aux plannings 3 et 4 et 3 chauffeurs au planning 6. Le Tableau 49 donne les six scénarios 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 du CHU.

Scénario	Nbre Chauffeurs par plannings					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
0	1	1	2	2	0	3
1	2	0	3	2	0	2
2	2	0	3	3	0	1
3	2	0	3	2	1	1
4	3	0	1	2	1	2
5	3	0	2	2	0	2
6	3	0	2	3	0	1

Tableau 49 : Répartitions des chauffeurs par 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 réplications.

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

Tableau 50 : 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.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié un problème de transport de plusieurs types de produits pour lesquels le nombre de chauffeurs et leurs plannings étaient imposés. Nous avons assimilé notre problème à un PDP-TW-FL dans lequel nous intégré un certain nombre de contraintes additionnelles :

- des activités de transport décomposées en étapes,
- un planning pour chaque chauffeur,
- la prise en compte de différentes ressources mobiles, telles que les chauffeurs, les véhicules, les contenants,
- la prise en compte de différentes ressources fixes, telles que les lignes de production, les aires de nettoyage et les quais,
- un planning d'ouverture pour chaque ligne de production et chaque aire de nettoyage,
- la prise en compte de transports à vide dans le cas où le chauffeur change de véhicule lorsqu'il passe d'un transport d'un type de produit à un transport d'un autre type,
- les contraintes de précedence entre les activités de transport.

Ce problème consiste à ordonnancer et affecter les activités de transport aux différents chauffeurs de manière à réaliser toutes les activités tout en minimisant la somme des retards et le nombre d'heures supplémentaires. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé un couplage métaheuristique-modèle de simulation. La métaheuristique permet de résoudre le problème d'ordonnancement des activités de transport et le modèle de simulation le problème lié à la complexité due à l'utilisation des ressources.

Deux modèles de simulation ont été proposés : le premier dans un langage dédié et le second dans un langage de programmation afin de gagner en temps de calcul. Deux systèmes de voisinage ont été proposés : les résultats ont montré que le système de voisinage insertion-permutation permet d'obtenir de meilleurs résultats que le système de voisinage insertion.

Les méthodes ont été testées sur toutes les instances identifiées et décrites dans le chapitre 1 et des résultats intéressants ont été obtenus pour la phase 2 pour les chauffeurs polyvalents. Nous nous sommes rapidement aperçus de l'impact important des plannings de travail pour trouver des solutions applicables. Les responsables du CHU ont alors exprimé le souhait de disposer d'un outil d'aide à la décision qui permette non seulement de déterminer l'affectation et l'ordonnancement mais aussi de déterminer le nombre chauffeurs et leurs plannings.

Chapitre 4 Dimensionnement et constitution de plannings journaliers pour les chauffeurs

1. Introduction

Un poste de travail est occupé par un chauffeur. Jusqu'à présent, nous avons pu répondre aux questions : Quel chauffeur réalise quel transport ? Dans quel ordre ? Pour quel résultat : les activités sont-elles toutes réalisées ? Y aura-t-il du retard ? Des heures supplémentaires ? Cependant, les responsables de la logistique se posent encore d'autres questions : Combien de chauffeurs sont vraiment nécessaires ? Quels sont les meilleurs horaires de travail ? Quand les chauffeurs peuvent-ils prendre leur pause ? En ce qui concerne le problème d'affectation et d'ordonnancement des activités de transport, nous avons proposé une méthode de résolution basée sur le couplage d'une métaheuristique et d'un modèle de simulation (Chapitre 3). Nous avons alors obtenu des solutions qui minimisent le nombre d'activités non réalisées, les retards et le nombre d'heures supplémentaires, tout en respectant les contraintes de fenêtre de temps, de charges complètes et d'utilisation des ressources. Malheureusement, toutes ces solutions sont obtenues pour un nombre de chauffeurs donné et des plannings imposés.

Nous avons vu que pour un même nombre de chauffeurs, les solutions obtenues donnent des résultats qui varient beaucoup en fonction des plannings. Nous avons également présenté que le nombre d'activités de transport varient tout au long de la semaine. Notre objectif est la détermination du nombre de postes de travail nécessaires à la réalisation de toutes les activités dans une semaine, la définition des horaires des plannings de travail de chaque poste de travail et l'affectation et l'ordonnancement des activités de manière à respecter des contraintes de précédence, de dates de disponibilités au plus tôt et de dates de fin au plus tard, dans l'objectif de réaliser toutes les activités et de minimiser les retards et les heures supplémentaires.

Nous avons donc identifié deux problèmes appartenant à deux horizons décisionnels différents :

- Opérationnel : le problème s'intéresse à l'affectation et l'ordonnancement sur une journée des activités de transport pour un nombre donné de chauffeurs et des plannings journaliers connus ;
- Tactique : le problème s'intéresse au dimensionnement du nombre de chauffeurs et à la détermination de leurs plannings journaliers de travail afin d'assurer l'ensemble des activités de transport tout en réalisant un compromis entre le nombre d'heures supplémentaires et le nombre de tâches en retard.

Nous allons tout d'abord décrire les conditions de travail des chauffeurs, c'est-à-dire l'amplitude horaire de leurs plannings et les pauses de 30 minutes pour la prise des repas. Ensuite, nous étudierons la littérature sur les problèmes de constitution de plannings en commençant par donner quelques définitions puis nous présentons les différentes méthodes employées pour ce problème. Avant de présenter notre méthode, nous abordons les problèmes de construction de plannings dans un problème de transport. Notre méthode est un processus itératif qui est composé de trois parties :

- Un modèle de simulation qui permet de déterminer le nombre de chauffeurs maximum nécessaires ;
- Un programme linéaire qui permet de construire les ensembles de plannings de travail ;
- Un couplage métaheuristique –modèle de simulation qui permet d'affecter et d'ordonnancer les activités de transport.

Avant de conclure, nous donnons les résultats que nous avons obtenus avec cette méthode.

2. Modèle de connaissance

Nous allons commencer par décrire le contexte dans lequel se réalise cette étude. Nous présentons ensuite les différents aspects de la construction des plannings des chauffeurs.

2.1. Contexte hospitalier

Comme nous l'avons abordé au Chapitre 1, le nombre d'activités de transport varie de deux manières :

- Au fil de la semaine les besoins des unités de soins et l'activité des unités de production ne sont pas les mêmes, nous avons donc un nombre variable d'activités du lundi au dimanche ;
- Les différents changements liés au transfert, à la centralisation des unités de production et à l'agrandissement, ont également un impact sur le nombre des activités de transport de la semaine.

Au début de cette étude, le nombre de transport de produits était relativement limité : chaque hôpital était doté d'unités de production relais permettant ainsi de préparer les repas, les médicaments ou le linge sur place. Le responsable des transports devait alors organiser : 12 activités de transport de repas, 26 pour le linge, 4 pour les médicaments, soit un total de 42 activités par jour. Les unités de production sont ouvertes certains jours de la semaine, seule l'unité de production des repas réalise une prestation 7 jours sur 7. Les unités fermées le week-end ne peuvent accueillir de véhicule, il est donc impossible de décharger un véhicule le week-end pour prendre de l'avance. Ainsi, les activités de transports sont plus importantes du lundi au vendredi et seules les activités de transport de repas sont maintenues le week-end. Par exemple, pour la phase 2, nous avons une demande de transports présentée dans le Tableau 51.

Jours	Lu	Ma	Me	Je	Ve	Sa	Di
Nombre de distribution de contenant propre	30	28	28	28	30	14	14
Nombre de retour de contenant sale	31	25	25	25	31	14	14
Nombre total des activités	61	53	53	53	61	28	28

Tableau 51 : variation du nombre d'activités sur une semaine

Le nombre d'activités présenté dans le Tableau 51 varie en fonction du jour de la semaine. En effet, le nombre de retours de contenants sales est plus important le lundi en raison de la consommation des produits durant le week-end. De même, chaque contenant propre étant dédié à une unité de consommation, ces contenants ne sont forcément remplis, alors que les contenants sales sont eux bien remplis. Et, en prévision de la consommation du week-end, un nombre plus important de distributions de contenants propres est observé le vendredi.

2.2. Les plannings des chauffeurs

La particularité des chauffeurs travaillant pour le CHU est qu'ils ne sont pas soumis à la réglementation des chauffeurs telle qu'elle est décrite dans la réglementation européenne. En effet, pour les « *Véhicules appartenant à des pouvoirs publics ou loués sans conducteur par ceux-ci pour effectuer, dans le cadre de leur mission de service public, des transports par route qui ne concurrencent pas les entreprises de transport privées* », les articles 6, 7, 8 et 9 de la réglementation européenne relative au transport ne sont pas applicables. Ces articles concernent entre autres la réglementation sur le temps de conduite et de pause. Par conséquent, les chauffeurs travaillent selon des plannings de travail propres au CHU.

Un chauffeur occupe un poste de travail, caractérisé par un planning de travail d'une durée de 8h consécutives avec une pause de 30 minutes pour le repas. Un planning de travail peut débuter entre 6h et 11h30, par pas de 30 minutes. De même, les pauses peuvent débuter entre 11h et 13h30, par pas de 30 minutes. L'ensemble de ces dates : date de début de travail, de fin de travail, de début de pause et de fin de pause, constitue un **planning de travail**. Lorsque les chauffeurs et les véhicules ne sont pas occupés, ils sont au dépôt. Un chauffeur commence et finit son travail au dépôt et effectue sa pause au dépôt. Les véhicules non utilisés sont au dépôt.

Nous appelons **ensemble de plannings**, la description des plannings de travail de chaque chauffeur. Par exemple, si nous prévoyons un effectif de 8 chauffeurs, nous aurons un ensemble de 8 plannings de travail.

Nous retrouvons la même modélisation que celle que nous avons vue dans le Chapitre 3 pour les activités de transport (distribution de contenant propre et retour de contenant sale) composées de 5 étapes chacune. Chacune de ces étapes nécessite des ressources et a une durée connue. Les activités de transport sont définies de la même façon que dans le chapitre précédent.

Nous retrouvons également les trajets à vide qu'il faut réaliser dans certaines conditions (énumérées dans le chapitre précédent). De même, les contraintes que nous avons prises en compte restent inchangées (respect des dates de début au plus tôt et dates de fin souhaitées, de précédence entre les activités de transport, des plannings journaliers de chauffeurs et des ressources et du nombre de ressources disponibles).

Les responsables ont ainsi exprimé leur souhait de pouvoir construire des plannings tout en prenant en compte le niveau opérationnel. En effet, pour valider la construction des plannings sur une semaine, à savoir du lundi au dimanche, les responsables ont indiqué qu'ils ne le feraient qu'en visualisant l'activité des chauffeurs sur les différents jours de la semaine. C'est pourquoi, pour chaque ensemble de plannings construit, nous vérifierons au préalable que l'ensemble des activités peuvent être réalisées à l'aide du couplage métaheuristique – modèle de simulation présenté dans le chapitre précédent. Les principales difficultés que nous aborderons dans ce chapitre seront le dimensionnement et la constitution des plannings de travail des chauffeurs.

L'objectif de notre problème est de :

- dimensionner le nombre de chauffeurs nécessaires,
- déterminer pour chaque chauffeur son planning journalier,
- affecter les activités aux chauffeurs,
- ordonnancer les activités affectées à chaque chauffeur,

de manière à minimiser le nombre de chauffeur et à réaliser l'ensemble des activités de transport pour chaque jour de la semaine tout en respectant les contraintes de précédence, de dates de début au plus tôt et de dates de fin au plus tard avec un nombre donné de ressources matérielles.

3. État de l'art

Selon (Varone 2009), le problème de construction de plannings consiste à affecter du personnel à des services tout au long d'un horizon temporel tout en prenant en compte des contraintes de temps, de disponibilité, de compétence, de charge de travail et de rotation. L'horizon temporel est divisé en périodes, au cours desquelles les services peuvent être traités. Chaque service dure une ou plusieurs période(s), et peut être fait durant n'importe quelle période d'un sous-ensemble de périodes. Le personnel dispose également d'un sous-ensemble de périodes durant lequel il est disponible. Un service demande un ensemble de compétences pour être traité, et un employé a un sous-ensemble de compétences. Un employé a une durée de travail contractuelle, et peut aussi exprimer une préférence quant aux services à effectuer. L'objectif est de minimiser les coûts d'affectation du personnel et l'insatisfaction du personnel.

Les problèmes d'affectation du personnel sont aussi appelés « staff-rostering » ou problème de conception d'horaires. De manière générale, ces problèmes consistent à concevoir des horaires de travail (ou planning de travail) pour le personnel d'une organisation afin de satisfaire la charge de travail prévue sur une période donnée. La charge de travail (ou demande) est définie comme le nombre d'employés nécessaires à chaque unité de temps.

L'horizon de planification correspond à l'intervalle de temps où un planning est construit. Par exemple, un planning peut être construit pour une journée, une semaine, un mois ou encore un an.

Les plannings sont des calendriers de travail, où figurent à la fois le temps, l'affectation du personnel, les jours et les plannings journaliers de travail, ainsi que les congés et les repos (Joseph, 2003). Il existe différents types de plannings :

- Plannings journaliers : ils spécifient les pauses et plannings journaliers de travail de la journée de chaque employé ;
- Plannings annuels : ils indiquent uniquement les volumes horaires de semaine de chaque employé ainsi que leur période de repos ;
- D'autres plannings donnent un certain nombre d'éléments complémentaires comme les tâches à effectuer pour chaque période, les compétences nécessaires...

En plus de cette distinction, nous trouvons dans la littérature encore une autre distinction :

- Les plannings cycliques : le même planning est répété tant que la demande reste inchangée. Cela signifie que les plannings construits pour une journée sont les mêmes sur les jours suivants jusqu'à ce qu'un élément varie (demande, durée de travail hebdomadaire, ...) ;
- Les plannings acycliques : un planning est construit pour chaque période. Ce cas s'applique si la demande varie et si les plannings ont différentes durées et différentes dates de début de travail.

Dans le cadre des problèmes de planification du travail du personnel, (Ernst, Jag, Krishnamoorthy, & Sier, 2004) proposent un état de l'art complet sur le sujet. Dans leur article, les auteurs décrivent un processus de résolution du problème de construction des plannings en général. Ce processus est

composé de plusieurs étapes, la première consiste à modéliser la demande. Les auteurs ont identifié différents types de demande :

- La demande basée sur les tâches (Task based demand) : la demande est obtenue à partir d'une liste de tâches à réaliser. Ces tâches sont définies selon une date de début, une durée et éventuellement une fenêtre de temps durant laquelle la tâche doit être effectuée. Ce profil de demande est généralement utilisé pour les problèmes de transport (Brandão & Mercer, 1997), (Eliyi, Ornek, & Karakütük, 2009) ;
- La demande flexible (flexible demand) : cette demande requiert des techniques de prévision pour la définir. Elle est exprimée à l'aide d'une courbe de charge qui permet de suivre l'évolution du nombre de personnes nécessaires pour chaque période de la journée. Ce profil de demande est utilisé pour les problèmes concernant les centres d'appel ou le personnel au sol des aéroports ;
- La demande basée sur les vacations (shift based demand) : une vacation est une plage de planning journalier où les ressources sont nécessaires. Cette demande est exprimée en nombre de personnes nécessaires pour chaque vacation. Ce profil de demande est surtout pris en compte pour les problèmes de planification d'infirmiers (Trilling, 2006).

Une fois la demande modélisée, l'étape suivante consiste à construire des plannings afin de satisfaire cette demande. Pour résoudre ce problème, différentes approches sont utilisées : la programmation par contraintes, les métaheuristiques, les modèles mathématiques (génération de colonnes, programmation linéaire,...).

La construction des plannings consiste :

- soit à déterminer les plannings travaillés et le nombre de personnes affectées à chaque planning, l'horizon de planification est souvent le mois ;
- soit à déterminer des heures de début et de fin des plannings ainsi que les heures de début des pauses pour chaque employé, l'horizon de planification est la journée ou la semaine.

Nous allons poursuivre en étudiant les articles qui traitent de la construction de plannings.

3.1. Problème de construction des plannings

Le problème de construction des plannings a été introduit par (Edie, 1954). (Dantzig, 1954) propose alors une modélisation mathématique du problème qui est utilisé comme référence dans un grand nombre de travaux de la littérature. Le modèle proposé est décrit de la manière suivante. Soit x_j le nombre d'employés commençant leur travail à la date j , où $j = 0, 1, 2, 3, \dots, n$, n étant le nombre de périodes auxquelles un planning peut commencer. Une journée de travail est décomposée en T périodes, chaque période correspondant à une tranche horaire de 30 minutes. b_t est le nombre d'employés nécessaires à une période t de la journée. Un employé travaille pendant M périodes consécutives ($T = n + M$). L'auteur a défini $a_{t,j}$ qui vaut 1 si $t = j, \dots, j + 6, j + 8, \dots, j + M$ et 0 si $t = j + 7$ ce qui correspond à la pause repas. Ce modèle pose les bases du problème en proposant de minimiser le nombre de personnes :

$$\min \sum_{j=0}^T x_j, \text{ où } x_j \geq 0$$

Sous contrainte de :

$$\sum_{j=0}^T a_{t,j} \times x_j \geq b_t, \text{ où } t = 1, 2, \dots, n + M$$

Cette contrainte vérifie que le nombre d'employés affectés est supérieur ou égal au nombre d'employés nécessaires à la période t . Nous obtenons ainsi une liste de plannings définis avec une date de début de planning, la durée du planning et la pause étant fixées au début. Dans ce modèle, pour un planning de 7h, une pause de 30 minutes sera obligatoirement prise 3h30 après le début du travail.

(Aykin, A comparative evaluation of modeling approaches to the labor shift scheduling problem, 2000) propose un comparatif des différents modèles présentés depuis les travaux de (Dantzig, 1954). Depuis des extensions ont été apportées : la détermination des heures de pauses. Les principaux travaux mentionnés par les auteurs sont (Betchold & Jacobs, 1990) et (Thompson, 1995).

(Betchold & Jacobs, 1990) ont proposé une modélisation qui prend en compte le placement implicite des pauses réduisant ainsi la taille des programmes linéaires en nombre entier. Dans leur étude, les auteurs travaillent selon les hypothèses suivantes :

- La construction des plannings est réalisée sur une demande de ressources de moins de 24h ;
- Les plannings ont tous la même durée de travail ;
- Chaque planning a une seule pause ;
- La durée de la pause est d'une ou plusieurs période(s) ;
- Chaque planning a une fenêtre de temps définissant le moment autorisé pour la pause ;
- Le sous-effectif est également interdit.

L'objectif du problème est de construire des plannings journaliers en minimisant le nombre d'employés tout en respectant des pauses (repas, ...).

Quelques années plus tard, (Thompson, 1995) propose une formulation avec des plannings ayant des durées de travail différentes. Cette formulation permet de prendre en compte des plannings autre que des plein temps. La durée des plannings détermine la durée de la pause. Le coût des solutions est évalué en fonction du coût d'affectation des employés. L'évaluation est faite suivant une fonction linéaire liée à la durée du planning de travail, ne prenant pas en compte le coût d'un plein temps, mi-temps,...).

(Aykin, A comparative evaluation of modeling approaches to the labor shift scheduling problem, 2000) propose de modéliser plusieurs pauses pour un même planning : une pause, un repas et une pause. En effet, leur formulation permet de prendre en compte 3 pauses dans un planning journalier. Le problème consiste donc à construire des plannings tout en minimisant le coût d'affectation des employés à chaque planning $k \in K$ (K désigne l'ensemble des plannings) :

$$\min \sum_{k \in K} c_k x_k$$

Le coût d'affectation des employés correspond au salaire versé à l'employé travaillant selon le planning k . La variable x_k correspond au nombre d'employés affectés au planning k .

Sous contraintes de :

$$\sum_{k \in K} a_{k,t} x_k - \sum_{k \in T1_t} U_{k,t} - \sum_{k \in TL_{t-1}} W_{k,t-1} - \sum_{k \in TL_t} W_{k,t} - \sum_{k \in T2_t} V_{k,t} \geq b_t, \text{ pour tout } t \in T$$

Cette contrainte permet de vérifier que pour chaque période t , le nombre d'employés affectés auquel on retranche le nombre d'employés en pause, est inférieur ou égal à la demande.

$$x_k - \sum_{t \in B1_k} U_{k,t} = 0, \text{ pour tout } k \in K$$

$$x_k - \sum_{t \in BL_k} W_{k,t} = 0, \text{ pour tout } k \in K$$

$$x_k - \sum_{t \in B2_k} V_{k,t} = 0, \text{ pour tout } k \in K$$

$$x_k, U_{k,t}, W_{k,t}, V_{k,t} \geq 0 \text{ et entières}$$

Les contraintes présentées prennent en compte les pauses définies par :

- $U_{k,t}, V_{k,t}$ et $W_{k,t}$: variables de pauses représentant le nombre d'employés affectés au planning k qui prennent respectivement leur première pause, leur repas et leur 2^{de} pause à la période t ;
- $B1_k, BL_k, B2_k$: ensemble de périodes non travaillées du planning k pour la 1^{ère} pause, le repas et la 2^{de} pause ;
- $T1_t, TL_t, T2_t$: ensemble de plannings pour lesquels la période t est une date de début de pause comprise dans la fenêtre de pause.

Dans ces différentes études, seul le coût d'affectation des employés ou le nombre d'employés affectés sont pris en compte dans l'évaluation de la fonction objectif. Le coût d'affectation est obtenu de différentes manières : le coût du salaire versé par employé affecté pour un type de planning (plein temps, mi-temps, ...), ou le coût de main d'œuvre par heure travaillée.

(Musliu, Schaerf, & Slany, 2004) proposent de résoudre un problème de construction de plannings journaliers sans pause (date de début et de fin du planning) et de détermination du nombre de personnes affectées aux plannings et ce pour un horizon d'une semaine de travail. Pour chaque planning à construire, les dates de début au plus tôt et les dates de début au plus tard sont renseignées. De même, les durées minimale et maximale des plannings sont renseignées. Un planning construit est donc défini par une date de début de travail et une durée de travail. Un type de planning correspond à l'ensemble des plannings dont la date de début et la durée sont identiques. Le but du problème est de minimiser le nombre de plannings distincts, le surplus ou le manque d'employés par rapport à la demande et l'écart par rapport au nombre moyen de permanences assurées par employé par semaine. Deux quantités sont définies pour déterminer l'écart avec le nombre moyen de permanences assurées par les employés :

- limite supérieure du nombre de plannings de travail par semaine et par employé,
- nombre moyen d'heures de travail par semaine et par employé.

Pour résoudre leur problème, les auteurs utilisent une recherche tabou. Le système de voisinage choisi consiste à modifier une solution selon quatre mouvements possibles :

- diminuer la date de fin d'un planning et augmenter la date de début d'un planning de la même durée,
- déplacer un employé d'un planning sur un autre,
- modifier les dates de début de planning,
- fusionner le nombre d'employés de deux plannings et supprimer un planning,
- fractionner un planning en deux.

La solution initiale est construite selon une procédure de génération aléatoire : un certain nombre de plannings est rendu actif ou inactif et pour chaque planning un nombre aléatoire d'employés est défini pour chaque jour. Les auteurs ont testé leur méthode de résolution sur des instances générées aléatoirement. Différents paramétrage de la méthode sont testés : longueur de la liste tabou et les paramètres du système de voisinage.

(Gärtner, Musliu, & Slany, 2005) ont repris l'étude précédente à laquelle ils ont ajouté la prise en compte des pauses. Un planning de travail légal inclut une pause plus ou moins longue pour chaque employé. Cette pause doit être prise après une certaine durée de travail et les employés doivent rester un certain temps au travail avant de finir leur journée. Une pause est définie par :

- Une durée maximale et minimale ;
- La date de début au plus tôt est déterminée par la date de début du planning et la durée de travail minimale de travail qui doit être réalisée avant de la prendre ;
- La date de début au plus tard est déterminée par la date de fin du planning et la durée de travail minimale de travail qui doit être réalisée après l'avoir prise ;
- La date de fin de pause qui est déterminée par la durée de travail qui devra être réalisée avant la fin du planning journalier.

De même, (Di Gaspero, Gärtner, Musliu, Schaerf, Schafhauser, & Slany, 2010) proposent de prendre en compte des durées minimales de travail avant une pause ou après une pause. Les employés doivent avoir travaillé un certain temps avant de pouvoir prendre une pause et travailler un certain temps avant de terminer leur journée (Figure 81).

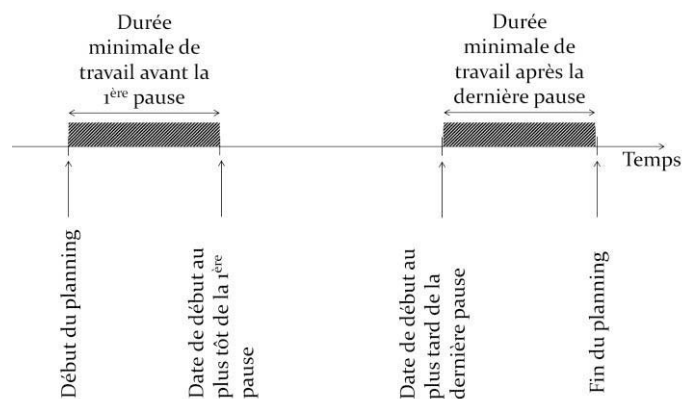


Figure 81 : Gestion des pauses sur un planning pour un employé

Pour résoudre ce problème, (Di Gaspero, Gärtner, Musliu, Schaerf, Schafhauser, & Slany, 2010) proposent quant à eux d'utiliser une recherche locale pour construire les plannings et un programme linéaire pour résoudre le problème d'affectation des pauses. Les auteurs ont testé leur technique de résolution sur une construction de planning et des pauses définies par le programme linéaire. Le couplage de la recherche locale et du programme linéaire ont montré leur efficacité pour optimiser le nombre d'employés utilisés que ce soit pour des instances de la littérature ou pour des instances du monde réel.

(Gärtner, Musliu, & Slany, 2005) renseignent également le nombre de pauses à prendre. Par conséquent, les auteurs proposent de générer des pauses dans les plannings journaliers construits à l'aide d'une heuristique mettant en œuvre un algorithme glouton composé de trois phases : trouver la plage horaire légale de prise de la pause, trouver la meilleure date pour la pause et déterminer la durée de la pause. La fonction objectif utilisée pour évaluer une solution est composée de 4 critères : le nombre excédentaire d'employés (F_1), le nombre d'employés manquants (F_2), le nombre de plan-

nings (F3) et le nombre moyen d'employés en service le week-end (F4). Cette méthode a été testée sur une instance réelle. Pour chaque critère, une pondération a été affectée : 0,6 pour F1, 0,8 pour F2 et 36 pour F3 (F4 n'est pas pris en compte). La méthode a permis d'améliorer le nombre excédentaire de chauffeur tout en conservant le nombre de plannings par rapport à l'organisation existante. Par contre, le nombre de chauffeur manquant et le nombre d'employés en service le week-end sont plus importants ce qui s'explique avec le fait que le critère F4 n'est pas pris en compte.

Pour conclure sur la construction de plannings, nous avons indiqué pour chaque référence les hypothèses de modélisation telles que : le type de planning (cyclique), l'horizon de planification, les dates de début et les durées des plannings,... ; ainsi que les critères de performances utilisés.

Références								
Caractéristiques		(Dantzig, 1954)	(Betchold & Jacobs, 1990)	(Thompson, 1995)	(Aykin, 2000)	(Musliu, Schaerf, & Slany, 2004)	(Di Gaspero, Gärtner, Musliu, Schaerf, Schafhauser, & Slany, 2010)	(Gärtner, Musliu, & Slany, 2005)
Hypothèses	Plannings cycliques					x		
	Horizon de planification	1j	1j	1j	1j	7j	1j	7j
	Durées plannings imposées et égales	x	x			x		
	Durées plannings imposées et différentes			x	x			
	Durées plannings à déterminer						x	x
	Dates de début des plannings imposées					x		
	Nombre de pauses	1	1	1	3	0	>10	>10
	Date de début de pause imposée	x						
	Date de début de pause à déterminer		x	x	x		x	x
	Durée des pauses fixées	x			x			
	Durée des pauses à déterminer		x	x			x	x
Critères	Nombre d'employés affectés	x						
	Coût d'affectation des employés				x			
	Nombre de plannings distincts					x	x	x
	Somme du nombre d'employés en surplus par rapport à la demande					x	x	x
	Somme du nombre d'employés manquants par rapport à la demande					x	x	x
	Ecart avec le nombre moyen de permanence par employé et par semaine					x		x

Tableau 52 : Les caractéristiques des références du problème de construction de plannings

Le problème de construction de plannings a été traité de nombreuses manières : les plannings sont ou non imposés (dates de début et de durées), les pauses sont ou non imposées (nombres, dates de début et durée). L'évolution des modèles a permis de prendre en compte de nombreuses hypothèses et les critères ont également évolué. L'horizon de planification des plannings est de 1 journée ou une semaine.

Nous pouvons constater que le problème de la construction des plannings est traité depuis longtemps et que le problème a été abordé dans de nombreux domaines d'application (Ernst, Jiag, Krishnamoorthy, & Sier, 2004) : les centres d'appel, les services d'urgence (police), les services civiques (surveillant dans les écoles, personnel militaire), les aéroports (personnel au sol, pilotes, ...),... parmi tous les domaines qui ont un jour traité le problème de construction de plannings, deux ont retenu notre attention : les systèmes hospitaliers avec la planification des plannings des infirmières et les systèmes de transports et plus particulièrement le transport public.

3.2. Les plannings du personnel soignant dans le système hospitalier

Dans les systèmes hospitaliers, les restrictions de budget et la mutualisation des ressources ont entraîné une réflexion importante sur la gestion des ressources et notamment des ressources humaines. (Trilling, Guinet, & Le Magny, 2005) ont étudié le problème de planification de personnel au sein d'un Plateau Médico-Technique (PMT). Le personnel infirmier (Infirmier Anesthésiste Diplômé d'Etat IADE) travaille selon des plannings dont les horaires sont donnés :

- journée anesthésie programmée 8-16h (5 / 7 jours),
- journée anesthésie urgence 8h-20h (7 / 7 jours),
- nuit anesthésie urgence 20h-8h (7 / 7 jours),
- supervision de la salle de soins post-interventionnels 9h-17h ou 11h-19h (5 / 7 jours).

Chaque IADE travaillera selon un planning fixé par jour parmi ceux que nous venons de présenter. Evidemment, l'enchaînement des plannings est réglementé et fera partie des contraintes à respecter. Les hypothèses prises en compte dans ce problème sont :

- Les dates de début et de fin de plannings de travail sont connues ;
- Les besoins en nombre d'IADE pour le jour j et l'activité k sont connus ;
- Pour chaque activité le nombre d'heures de travail nécessaire est connu ;
- La durée réglementaire de travail hebdomadaire est fixée à 38h ;
- La durée de travail hebdomadaire maximum est fixée à 48h ;
- La pénibilité du travail pour l'activité k et le jour j est connue ;
- L'horizon de planification est de 7 jours à 1 mois ;
- Le nombre total d'IADE est connu.

Le problème présenté consiste à construire le planning des infirmiers anesthésistes qui respecte les réglementations concernant les temps de travail (38h dans l'étude) et les désirs du personnel en terme de jours de congé tout en maximisant l'équité de la répartition de la charge de travail dans l'affectation aux postes. L'équité est évaluée en fonction d'un coefficient associé à chaque tâche. Ainsi, l'objectif sera de la minimiser. La réglementation du travail des IADE est très stricte sur les durées de travail hebdomadaires et les enchaînements possibles des plannings de travail :

- Un employé n'a pas le droit de travailler plus de trois nuits par semaine ;
- Travailler le samedi implique de travailler obligatoirement le dimanche ;
- Travailler le jour j en journée implique de travailler de nuit le jour $j + 1$ et d'être en repos le jour $j + 2$.

Ce type de planification où les horaires des plannings sont fixés et où l'horizon de planification permet de prendre en compte les jours de congé et le nombre d'heures de travail hebdomadaire ne semblent pas correspondre à notre problème. En effet, nous devons déterminer les horaires de travail des chauffeurs et vérifier que les activités à réaliser sont toutes effectuées. Nous allons maintenant présenter le problème de construction de plannings dans le domaine des transports.

3.3. Construction des plannings dans un problème de transport

Le problème prenant en compte à la fois la construction de plannings pour des chauffeurs et l'organisation de transport qui nous a semblé le plus proche est le Vehicle Routing and Scheduling Problem (VRSP). Ce problème consiste à affecter un ensemble de voyages programmés à un ensemble de véhicules, tout en respectant un certain nombre de contraintes et en minimisant une fonction objectif (Baita, Pesenti, Ukovich, & Favaretto, 2000). Parmi ces contraintes, nous trouvons les contraintes liées aux règles de construction des plannings des chauffeurs (temps de conduite maximal, pauses légales, ...) Une tournée correspond à un ensemble de voyages à effectuer et un voyage est composé d'un certain nombre de demandes en commençant et finissant au dépôt, par exemple le parcours d'une ligne de bus.

Nous avons aussi identifié quelques extensions : VRSP with Time Window Constraints, ce problème intègre une contrainte de fenêtre de temps sur les voyages et le Multi-trip Vehicle Routing and Scheduling Problem présenté par (Brandão & Mercer, 1997). Ce dernier consiste à organiser des tournées qui sont composées de voyages. Les auteurs prennent en compte un certain nombre de contraintes :

- Chaque jour un véhicule peut réaliser un ou plusieurs voyages ;
- Les clients imposent une date de livraison (fenêtre de temps) ;
- Chaque véhicule est caractérisé par une capacité donnée ;
- Les durées de déchargement sont prises en compte ;
- Des véhicules peuvent être loués si la flotte est insuffisante ;
- L'accès aux clients est limité à certains véhicules ;
- Les règles de construction des plannings des chauffeurs doivent être respectées.

Les chauffeurs travaillent pendant une durée légale de conduite de 9h qui inclut les temps de pause, sachant qu'il ne peut pas enchaîner plus de 4h30 de conduite successives. En cas de nécessité, un chauffeur peut effectuer quelques heures supplémentaires (1 heure) à condition qu'il effectue une pause de 0 à 45 minutes, la durée de la pause étant liée au nombre d'heures supplémentaires effectuées. Il faut noter le fait que les véhicules peuvent partir chargés ou à vide à partir du dépôt. Les différentes tournées ainsi définies sont ensuite affectées à un véhicule. Les plannings de chauffeurs sont donc construits en fonction des voyages qui sont affectés à un véhicule. Pour évaluer une solution, les auteurs évaluent un certain nombre de critères :

- Le retard total des voyages calculé à partir du retard de chaque demande ;
- Le nombre de demandes non réalisées dans un voyage, une demande est dite « non réalisée » lorsque la livraison n'est pas effectuée avant la date de livraison imposée par le client ;
- Les heures supplémentaires effectuées par le chauffeur.

Pour résoudre leur problème les auteurs utilisent une méthode de résolution composée de trois phases :

- Phase 1 : pour chaque voyage, il s'agit d'affecter les demandes, tout en veillant au respect des **contraintes de fenêtre de temps**, en exécutant un ensemble de mouvements tels que des mouvements d'insertion et d'échanges ;
- Phase 2 : la construction des tournées en respectant les **contraintes de fenêtre de temps** et les règles de construction des **plannings des chauffeurs** qui consiste à affecter des voyages aux chauffeurs et s'il reste des voyages à affecter, utiliser des véhicules de location ;
- Phase 3 : Réduction des coûts tout en respectant la faisabilité de la solution.

Les auteurs ont utilisé leur méthode sur des instances proposées par le centre de distribution de l'entreprise Burton's Biscuits Ltd. Chaque instance correspond à une journée de la semaine. Le nombre de demandes varie pour chaque jour de la semaine entre 45 et 70 demandes par jour. Pour

chaque instance, les responsables d'entreprise ont donné des solutions. Les auteurs ont constaté que :

- L'une des instances présente deux demandes effectuées par un type de véhicule inapproprié et également deux demandes en retard (instance avec 54 demandes) ;
- Une autre montre que les demandes sont réalisées avec deux chauffeurs qui effectuent des heures supplémentaires (instance avec 68 demandes) ;
- Trois autres instances montrent qu'une à deux demandes sont réalisées en retard (instances comptant entre 51 et 70 demandes).

Leur méthode de résolution permet d'améliorer les résultats de chaque instance par rapport aux solutions proposées par les responsables de l'entreprise tant en respectant les contraintes de fenêtre de temps et les règles de construction des plannings des chauffeurs. Les solutions obtenues permettent de diminuer les durées de travail, les distances parcourues de plus de 20% en moyenne. De même, le nombre de véhicules utilisés est réduit de 20% en moyenne.

(Eliyi, Ornek, & Karakütük, 2009) ont modélisé le VRSP comme un Tactical Fixed Job Scheduling Problem (TFJSP) où les dates de disponibilité et les dates de fin des tâches sont fixées et l'objectif est alors de minimiser le coût d'utilisation des machines. Le TFJSP est une extension du Fixed Job Scheduling Problem qui consiste à ordonnancer des opérations sur des machines soumises à des plannings, tel que chaque tâche débute son traitement une fois sa date de disponibilité atteinte et ce traitement doit être terminé avant la date de fin souhaitée. Ce problème est typiquement un problème que l'on rencontre dans des applications réelles telles que les emplois du temps scolaires, les systèmes de transports et les constructions de plannings. Les auteurs ont démontré que les problèmes de type TFJSP sont NP-Difficiles. Ils proposent six heuristiques pour résoudre ce problème. Leurs heuristiques permettent d'obtenir de bons résultats avec des instances comptant jusqu'à 100 tâches.

(Kergosien, 2010) a travaillé sur un problème de dimensionnement d'équipe dans un environnement hospitalier. Leur problème concerne le dimensionnement d'une équipe de manutentionnaires pour livrer les produits (conditionnés dans des contenants) depuis le quai de déchargement jusqu'aux unités de soins et pour collecter les contenants vides depuis les unités de soins jusqu'aux quais de chargement en utilisant éventuellement des tracteurs électriques. Ce problème consiste à exécuter un ensemble de tâches à réaliser par des ressources en minimisant le nombre de ressources utilisées. L'auteur a modélisé son problème comme un « Fixed Job Scheduling Problem with Spread-Time Constraints ». L'auteur a commencé par déterminer les circuits des manutentionnaires en fonction des dates définies lors de la construction des tournées des véhicules. Ces circuits sont modélisés comme des tâches à réaliser et les manutentionnaires comme les ressources. L'auteur a considéré la durée totale de travail des manutentionnaires, il s'agit de vérifier que le nombre d'heures de travail total pour chaque manutentionnaire est inférieur ou égal au nombre d'heures total de travail réglementaire.

Pour conclure sur le problème de construction de planning dans un problème de transport, l'étude présentée par (Brandão & Mercer, 1997) est intéressante, par plusieurs aspects :

- Le fait que les contraintes prises en compte sont relativement proches de notre problème : les contraintes de fenêtre de temps, les plannings des chauffeurs, l'utilisation des véhicules liée à l'accessibilité de certains sites, les durées de déchargement prises en compte ;
- La taille des instances (de 45 à 70 demandes) est très comparable à la taille de nos instances ;
- Les critères de performances sélectionnés sont très similaires à ceux que nous proposons, seule la définition des demandes non réalisées diffère.

Toutefois, un certain nombre de contraintes ne sont pas prises en compte dans l'étude proposée par (Brandão & Mercer, 1997) dont l'objectif est d'affecter des voyages à un véhicule tout en respectant les règles de construction des plannings,

- Les ressources utilisées : les contenants, les quais de chargement ou de déchargement ne sont pas pris en compte ;
- Les contraintes de compatibilité entre les produits et les véhicules ;
- Les contraintes liées aux plannings d'ouverture des lignes de production et des aires de nettoyage ;
- Les contraintes de précédence entre les demandes ;
- Les dates de début au plus tôt des demandes.

Les problèmes de construction de plannings consistent à déterminer les dates de début et de fin de chaque planning ainsi que les dates de pause afin de répondre à une demande en employés pour chaque période de la journée. Ces problèmes prennent en compte un certain nombre de contraintes comme : les dates de début au plus tôt des plannings, les dates de fin au plus tard des plannings, les durées minimales et maximales, la durée minimale de travail et la durée maximale de travail avant de prendre une pause ou avant de finir son planning.

Nous avons vu que, en fonction des plannings de chaque chauffeur, l'ordonnancement des activités peut être amené à changer et la valeur de notre fonction objectif aussi. En fait, nous avons besoin pour chaque ensemble de planning construit pour chaque chauffeur d'évaluer la pertinence des plannings.

Nous avons également étudié les problèmes de type VSRP et les nombreuses extensions qui existent dans la littérature : le Multi-Trip Vehicle Routing and Scheduling Problem présenté par (Brandão & Mercer, 1997). Bien que présentant quelques lacunes en termes de prise en compte de contraintes, le PDP-TW-FL semble le plus proche de notre modèle. (Lee & Qi, 2009) ont démontré que ce type de problème est NP-difficile en le modélisant par un problème d'ordonnancement avec temps de setup dépendant de la séquence et avec dates de début.

4. Processus de résolution

Comme nous l'avons vu lors de la présentation de la variation des activités de transport au cours de la semaine, les responsables ont exprimé le désir d'avoir les mêmes plannings du Lundi au Vendredi. Nous avons remarqué que certains jours de la semaine ont un plus grand nombre d'activités à réaliser, notamment les lundis et vendredis. Nous avons choisi de travailler sur la construction des plannings pour les jours qui présentent le plus grand nombre d'activités. La construction des plannings consiste à déterminer les horaires de travail (heure de début, de fin de planning) ainsi que les horaires pour les pauses. Nous vérifierons ultérieurement que les plannings définis pour le jour ayant le plus grand nombre d'activités restent valables pour les autres jours de la semaine.

4.1. Algorithme de principe

Pour résoudre notre problème, nous proposons un processus itératif (Figure 82) composé de trois phases :

- A. L'évaluation par simulation du nombre maximal de chauffeurs nécessaires pour réaliser l'ensemble des activités de transport du jour comportant le plus grand nombre d'activités,

- En entrée de ce modèle de simulation, nous aurons un nombre de chauffeur illimité et non soumis à un planning et une liste d'activités triées en fonction des dates de début au plus tôt ;
 - Les objectifs de cette phase sont de construire la demande en chauffeur en fonction de la période de la journée et de déterminer le nombre maximum de chauffeurs nécessaires.
- B. La construction par un modèle linéaire du planning journalier de chaque chauffeur,
- En entrée de ce modèle linéaire, nous retrouvons les données que nous avons évaluées précédemment ;
 - Les objectifs de cette phase sont de construire des ensembles de plannings (le planning de chaque chauffeur correspond à un ensemble de plannings) pour l'ensemble des chauffeurs et de minimiser les écarts entre la demande et le nombre de chauffeurs disponibles.
- C. L'affectation et l'ordonnancement des activités en utilisant le couplage métaheuristique - modèle de simulation présenté dans le Chapitre 3.
- Les objectifs sont ici de vérifier la faisabilité de la solution obtenue précédemment en affectant les activités de transport à chaque période de travail, en ordonnant ces activités et de minimiser le nombre d'activités non réalisées, les retards et les heures supplémentaires.

Le processus est itératif, le nombre de chauffeurs est diminué à chaque itération jusqu'à ne plus trouver de solutions admissibles.

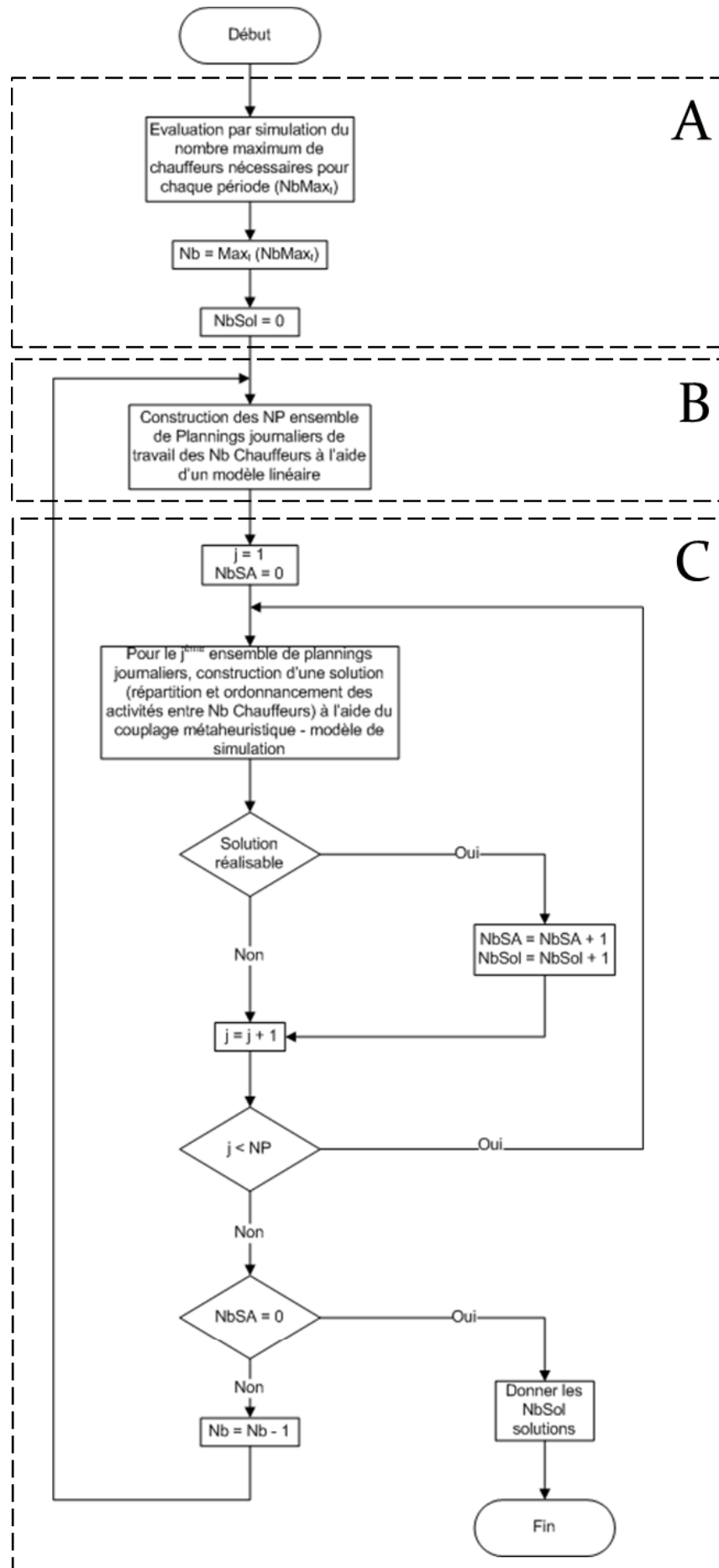


Figure 82 : Processus de résolution de notre problème

Les notations suivantes sont utilisées :

- $NbMax_t$ représente la demande de chauffeurs utiles pour réaliser l'ensemble des activités de transport pour chaque période t de 5 minutes ;
- Nb correspond au nombre maximum de chauffeurs utilisé dans la journée ;
- NP est le nombre d'ensemble de plannings construits pour un effectif donné ;
- $NbSA$ est le nombre de solutions admissibles que nous avons obtenues pour l'ensemble des tests réalisés pour un effectif de chauffeurs donné (Nb) ;
- $NbSol$ est le nombre de solutions réalisables obtenues pour l'ensemble des tests réalisés quel que soit l'effectif.

Nous allons maintenant décrire chaque phase du processus de résolution : l'évaluation de nombre maximum de chauffeur, la construction des différents plannings et l'affectation et l'ordonnancement des activités de transport.

4.2. Evaluation du nombre maximum de chauffeur

Nous proposons d'utiliser un modèle de simulation pour déterminer la date de début au plus tôt de chaque activité avec un nombre connu de ressources matérielles et un nombre illimité de chauffeurs (non soumis à un planning). La solution construite respecte les dates de début au plus tôt et de fin au plus tard et les contraintes de précédence.

Nous avons utilisé un modèle de simulation créé avec le logiciel Witness®. Ce modèle détermine l'affectation des activités de transport aux chauffeurs selon la règle FIFO : chaque activité se voit attribuer le premier véhicule et le premier chauffeur disponible dès sa date de début au plus tôt atteinte. Compte tenu de la durée des étapes, la journée est décomposée en période p de 5 minutes. Nous obtenons ainsi le nombre de chauffeur $NbUtil_p$ utilisé (Figure 83).

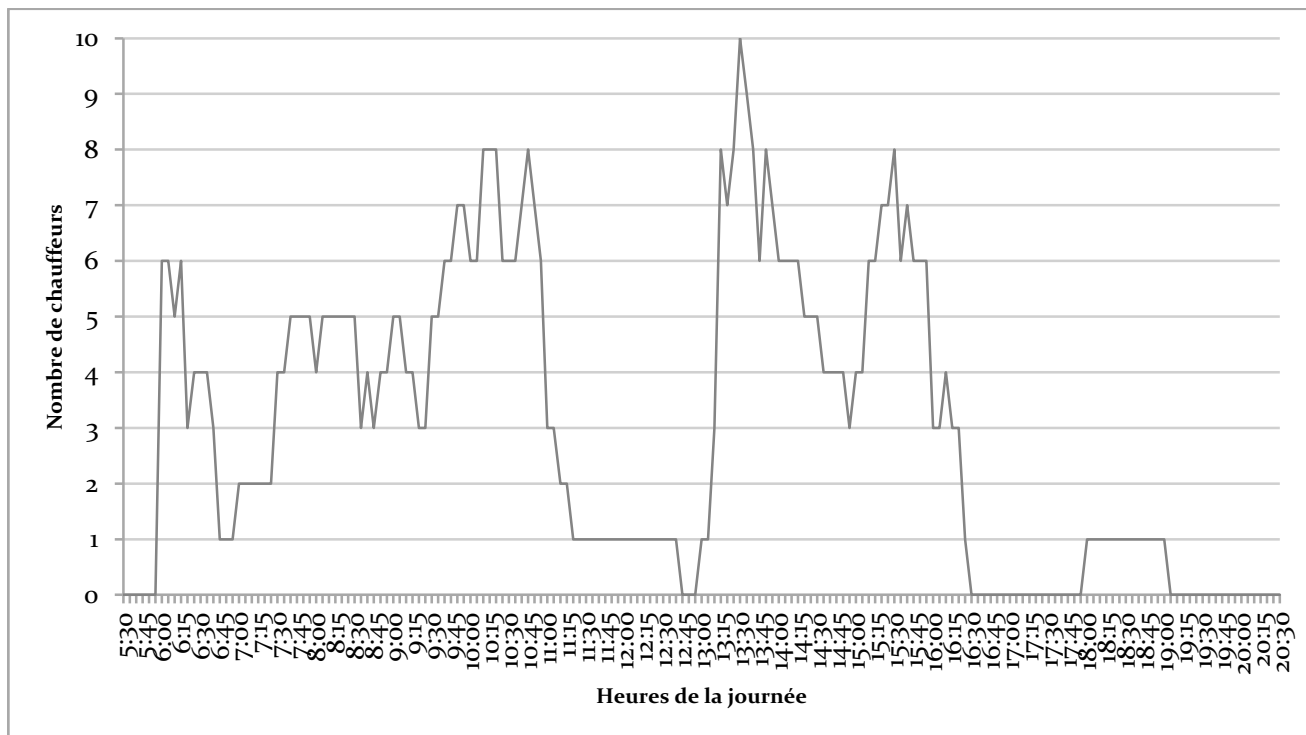


Figure 83 : Evolution du nombre de chauffeurs utilisés ($NbUtil_p$) pour réaliser les activités de transports

Etant donné que le planning d'un chauffeur ne peut débuter que toutes les 30 minutes, la journée est découpée en période de 30 minutes. Et le nombre de chauffeurs nécessaires pour la période t de 30 minutes est obtenue par :

$$NbMax_t = \max_{p=6 \times t, 6 \times t + 5} (NbUtil_p), \text{ pour } t \in T$$

Nous obtenons alors une expression du besoin du nombre de chauffeur pour chaque période d'une journée qui sera utilisée pour construire les plannings journaliers (Tableau 53).

Planning journalier	6h	6h30	7h	7h30	8h	8h30	9h	9h30	10h	10h30	11h	...
Période t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...
$NbMax_t$	6	4	2	5	5	5	6	7	8	8	3	...

Tableau 53 : Extrait de l'expression des besoins en chauffeurs

Le nombre maximum de chauffeurs nécessaires pour traiter l'ensemble des activités de transport est obtenu par le nombre de maximum de chauffeur utilisé sur l'ensemble des périodes considérées.

$$Nb = \max_t (NbMax_t), \text{ pour } t \in T$$

Une fois que nous avons obtenu les données concernant la demande en chauffeurs et la définition du nombre maximal de chauffeurs, nous poursuivons avec la phase suivante : la construction des plannings journaliers.

4.3. Construction des plannings journaliers

A partir des données obtenues avec le modèle de simulation, nous utilisons un modèle mathématique pour déterminer le planning journalier de chacun des Nb chauffeurs. Nous savons que le CHU impose certaines règles concernant la construction des plannings journaliers des chauffeurs :

- Les chauffeurs peuvent débuter leur journée de travail entre 6h et 11h30 par pas de trente minutes, soit 12 dates de début de planning possibles ;
- Leur pause de 30 minutes ne peut commencer qu'à partir de 11h30 et la dernière pause ne peut être prise au plus tard qu'à 13h30 et ce par pas de 30 minutes, soit 5 dates de début de pause possibles ;
- Un chauffeur peut débuter ou finir son planning par une pause de 30 minutes.

Au total, nous obtenons pour chaque chauffeur 60 plannings possibles.

La notation utilisée pour la formulation de notre problème :

Données	Notation
nombre de périodes de 30 minutes de l'horizon de planification	$T = 29$
nombre de périodes de 30 minutes successives travaillées (y compris la pause)	$M = 16$
ensemble des périodes auxquelles un chauffeur peut commencer son travail	P
ensemble des périodes auxquelles un chauffeur peut prendre sa pause	P'
nombre de chauffeurs demandés pour la période $t, t = 1, T$	$NbMax_t$

Tableau 54 : Notation des données pour le problème de construction des plannings journaliers

Nous avons défini les variables suivantes :

$x_{i,t} = 1$ si le chauffeur $i, i = 1, Nb$, commence son travail à la période $t, t \in P$, 0 sinon

$y_{i,t} = 1$ si le chauffeur $i, i = 1, Nb$ est en pause à la période $t, t \in P'$, 0 sinon

e_t Le nombre de chauffeurs manquant par rapport à la demande $NbMax_t$ à la période $t, t \in T$

L'objectif de notre problème est de minimiser la somme des chauffeurs manquants par rapport à la demande :

$$\min \sum_{t=1}^T e_t$$

Les contraintes à respecter sont les suivantes :

La contrainte 4.62 assure que chaque chauffeur débute une et une seule fois dans la journée. La contrainte 4.63 assure que chaque chauffeur réalise une et une seule pause dans la journée. L'écart à la demande est toujours supérieur ou égal à la différence entre le besoin en chauffeur et le nombre de chauffeur disponible auquel on soustrait le nombre de chauffeur en pause, selon la contrainte 4.64. Les contraintes 4.65 et 4.66 assurent la bivalence des variables x et y . La contrainte 4.67 vérifie que le nombre de chauffeurs manquants par rapport à la demande est toujours positif ou nul.

$$\sum_{t \in P} x_{i,t} = 1, i = 1, Nb \quad 4.62$$

$$\sum_{t \in P'} y_{i,t} = 1, i = 1, Nb \quad 4.63$$

$$e_t \geq NbMax_t - \left(\sum_{i=1}^{Nb} \sum_{t'=\max(1, t-M+1)}^t x_{i,t'} - \sum_{i=1}^{Nb} y_{i,t} \right), \text{ pour } t = 1, T \quad 4.64$$

$$x_{i,t} \in \{0,1\}, i = 1, Nb, t \in P \quad 4.65$$

$$y_{i,t} \in \{0,1\}, i = 1, Nb, t \in P' \quad 4.66$$

$$e_t \geq 0, t = 1, T \quad 4.67$$

Nous avons constaté que le modèle mathématique admet plusieurs solutions minimisant la somme du nombre de chauffeurs manquants par rapport à la demande, le modèle est utilisé pour construire NP ensemble de plannings. Chaque solution est utilisée pour construire une affectation des activités aux chauffeurs et leur ordonnancement.

4.4. Affectation et ordonnancement des activités de transport

En ce qui concerne cette étape, nous avons utilisé l'approche que nous avons présentée dans le chapitre précédent. Nous avons donc utilisé un couplage entre une métaheuristique et un modèle de simulation dont l'objectif est de construire une affectation et un ordonnancement réalisable pour un nombre de chauffeur donné et leur planning.

Afin de garder les solutions réalisables, nous avons défini $NbSa$ qui compte le nombre de solutions réalisables obtenues pour un nombre de chauffeurs donné et $NbSol$ qui compte le nombre total de solutions réalisables obtenues par le processus de résolution.

5. Mise en œuvre et résultats

Dans cette partie, nous illustrons le processus itératif proposé sur l'instance correspondant à la phase 2. Des résultats similaires ont été obtenus pour les autres phases.

Dans le Tableau 55, nous donnons pour chaque jour de la semaine, le nombre d'activités à réaliser. Nous pouvons constater que le lundi et le vendredi comportent le plus grand nombre d'activités. Nous avons choisi d'appliquer le processus proposé aux données du lundi, la faisabilité des solutions obtenues sera ensuite testée pour les autres jours.

Jours	Lu	Ma	Me	Je	Ve	Sa	Di
Nbre de distri. de cont. prop.	30	28	28	28	30	14	14
Nbre de retour de cont. sale	31	25	25	25	31	14	14
Total des activités	61	53	53	53	61	28	28

Tableau 55 : Variation du nombre d'activités de transports sur une semaine

Le Tableau 56 donne une synthèse des résultats obtenus pour 10, 9 et 8 chauffeurs, 10 étant le nombre de chauffeurs obtenus par le modèle de simulation lors de la phase A. Le processus n'a pas trouvé de solution réalisable pour 7 chauffeurs et s'est donc terminé. A chaque itération du processus, pour chaque valeur du nombre de chauffeurs, $NP = 50$ ensembles de plannings sont générés et pour chaque ensemble de planning, le couplage modèle de simulation – métaheuristique est utilisé (avec 3 000 000 d'itérations et un palier de 40 000 itérations). Dans le Tableau 56, seuls les ordonnancements où toutes les activités sont réalisées sont comptabilisés. Ces ordonnancements ont été classés en fonction de $H'2$ (somme des retards observés pour toutes les activités) et $H'3$ (somme des heures supplémentaires observées pour tous les chauffeurs) et le tableau donne pour chaque classe, la répartition en pourcentage des ordonnancements obtenus.

Nb Chauffeurs	NP avec $H1 = 0$	$H'2$	$H'3$
10	89%	0	0
	4,4%	20	0
	2,2%	25	10
	4,4%	40	De 10 à 20
9	29,09%	0	0
	16,36%	0	20
	25,45%	25	De 0 à 15
	5,45%	30	De 10 à 20
	3,64%	40	De 0 à 15
	1,82%	60	20
	3,64%	70	De 5 à 15
8	6,90%	0	De 25 à 50
	6,90%	20	De 40 à 75
	10,34%	25	De 30 à 85
	6,90%	30	De 15 à 80
	10,32%	40	De 45 à 115
	1,72%	60	5

Tableau 56 : Résultats obtenus avec 10 chauffeurs

Par exemple, pour 10 chauffeurs, 89% des solutions obtenues conduisent à des ordonnancements sans retard ni heure supplémentaire et toutes les solutions sont réalisables. Dans le cas avec 9 chauffeurs, nous avons observé que 14,55% des solutions construites ne conduisent pas à des solutions réalisables et seules 29,09% des solutions permettent d'obtenir des ordonnancements sans retards ni heures supplémentaires. Les résultats obtenus avec 8 chauffeurs montrent que seules 43,08% sont réalisables, mais aucune d'entre elles ne conduit à un ordonnancement sans retard ni heure supplémentaire. Pour 7 chauffeurs, la majorité des retards concernent les activités de transport de repas et ceux-ci ont été jugés non acceptables.

Le Tableau 58 et le Tableau 57 donnent les résultats détaillés pour 9 et 8 chauffeurs. Nous avons repris chaque ensemble de plannings et nous avons lancé 5 répliques du couplage modèle de simulation-métaheuristique du chapitre 3, afin de tester la robustesse des ensembles de plannings construits. Nous donnons les mêmes indicateurs que dans le chapitre précédent et nous pouvons constater que parmi les 50 ensembles de plannings, 15 peuvent être qualifié de robuste pour 9 chauffeurs et contre seulement 2 pour 8 chauffeurs. Nous qualifions de robuste un ensemble de plannings qui conduit à 100% de solutions réalisables. Ces tests permettent de confirmer que certains ensembles de plannings ne conduisent à aucune solution réalisable.

Ensembles de plannings	%SR	Retard				H. Supp			
		Moy	ET	Min	Max	Moy	ET	Min	Max
1	0%	124	81	30	225	31	24	0	60
2	0%	27	6	15	30	6	12	0	30
3	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
4	80%	11	2	10	15	2	4	0	10
5	0%	151	83	10	225	4	4	0	10
6	0%	45	0	45	45	5	0	5	5
7	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
8	100%	10	0	0	10	0	0	0	0
9	0%	31	17	10	45	0	0	0	0
10	40%	17	14	10	45	0	0	0	0
11	0%	15	0	15	15	0	0	0	0
12	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
13	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
14	0%	31	12	10	40	0	0	0	0
15	0%	17	14	10	45	1	2	0	5
16	20%	36	23	10	70	2	2	0	5
17	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
18	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
19	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
20	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
21	80%	17	14	10	45	1	2	0	5
22	0%	45	0	45	45	5	0	5	5
23	0%	41	17	10	60	0	0	0	0
24	40%	10	0	10	10	2	4	0	10
25	0%	48	4	45	55	0	0	0	0
26	0%	15	0	15	15	0	0	0	0
27	0%	15	0	15	15	0	0	0	0
28	60%	12	2	10	15	0	0	0	0
29	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
30	0%	117	24	105	165	0	0	0	0
31	0%	25	9	10	35	16	32	0	80
32	0%	86	38	10	105	20	10	0	25
33	0%	148	46	105	225	6	10	0	25
34	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
35	0%	17	14	10	45	0	0	0	0
36	0%	41	17	10	60	0	0	0	0
37	0%	127	59	50	175	14	2	10	15
38	0%	76	81	10	175	6	7	0	15
39	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
40	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
41	0%	15	0	15	15	0	0	0	0
42	0%	14	2	10	15	0	0	0	0
43	60%	12	2	10	15	0	0	0	0
44	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
45	20%	25	12	10	35	0	0	0	0
46	0%	15	0	15	15	0	0	0	0
47	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
48	0%	27	16	10	45	7	9	0	25
49	0%	60	12	45	70	0	0	0	0
50	0%	45	0	45	45	0	0	0	0

Tableau 57 : Résultats obtenus pour 9 chauffeurs et différents plannings (instance 21)

Ensembles de plannings	%SR	Retard				H. Supp			
		Moy	ET	Min	Max	Moy	ET	Min	Max
1	0%	29	12	15	40	23	20	0	50
2	60%	11	2	10	15	0	0	0	0
3	0%	87	30	40	115	6	7	0	15
4	0%	24	17	10	45	10	20	0	50
5	0%	14	2	10	15	8	16	0	40
6	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
7	80%	17	14	10	45	1	2	0	5
8	60%	14	6	0	25	0	0	0	0
9	0%	17	14	10	45	0	0	0	0
10	0%	15	0	15	15	0	0	0	0
11	0%	55	21	40	95	14	14	0	35
12	0%	38	14	10	45	0	0	0	0
13	60%	22	15	10	45	12	15	0	30
14	0%	20	10	15	40	11	16	0	40
15	0%	58	15	35	70	76	116	5	305
16	20%	21	13	10	45	5	4	0	10
17	40%	30	17	10	50	0	0	0	0
18	0%	31	7	20	40	0	0	0	0
19	0%	45	0	45	45	0	0	0	0
20	0%	37	6	25	40	0	0	0	0
21	0%	50	30	15	90	6	7	0	20
22	0%	15	0	15	15	0	0	0	0
23	0%	17	4	15	25	56	37	0	100
24	0%	50	64	10	175	5	10	0	25
25	80%	11	2	10	15	0	0	0	0
26	100%	10	0	10	10	0	0	0	0
27	20%	41	17	10	60	2	4	0	10
28	80%	10	0	10	10	15	30	0	75
29	0%	31	17	10	45	4	2	0	5
30	0%	60	35	15	110	63	70	0	160
31	0%	53	27	30	105	1	2	0	5
32	0%	47	64	15	175	47	82	0	210
33	0%	33	4	25	35	0	0	0	0
34	0%	31	17	10	45	0	0	0	0
35	0%	45	0	45	45	0	0	0	0
36	0%	15	0	15	15	0	0	0	0
37	0%	17	14	10	45	0	0	0	0
38	80%	10	0	10	10	0	0	0	0
39	0%	24	17	10	45	7	12	0	30
40	40%	20	20	10	60	47	61	0	155
41	0%	57	30	35	110	67	108	0	280
42	0%	67	15	40	85	56	65	0	170
43	20%	48	51	10	145	55	62	0	160
44	0%	38	0	10	90	1	2	0	5
45	0%	34	23	10	70	0	0	0	0
46	20%	11	2	10	15	20	26	0	65
47	0%	20	13	10	45	31	27	0	65
48	20%	31	14	10	45	25	28	0	80
49	80%	13	6	10	25	0	0	5	0
50	0%	22	10	10	30	0	0	0	0

Tableau 58 : Résultats obtenus pour 8 chauffeurs et différents plannings

Ces 17 ensembles de plannings présentent un retard systématique de 10 minutes qui se décomposent en un retard de 5 minutes pour 2 DCP de linge. Les solutions soit 85 solutions obtenues ont été modifiées pour correspondre aux activités du mardi (suppression d'activités dans l'ordonnancement) et le retard et les heures supplémentaires ont été évalués par le modèle de simulation. Nous avons pu constater que le retard sur ces deux activités de linge est également de 5 minutes.

6. Conclusion

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés, en plus de l'affectation et de l'ordonnancement des activités de transport à chaque chauffeur, à la construction des plannings journaliers de chaque chauffeur.

Nous avons étudié quelques articles pour identifier notre problème. Nous avons commencé par les problèmes de construction de plannings qui consistent à construire des plannings pour des équipes sur des horizons temporels variables (annuels, mensuels, hebdomadaires, journaliers). Les auteurs ont pris en compte des contraintes de durées de travail, de pauses,... Toutefois, ces problèmes ne prennent pas en compte l'ordonnancement des activités ou leur affectation. Nous avons donc décidé de poursuivre notre travail avec les problèmes de type Vehicle Routing and Scheduling Problem. Ces problèmes sont très intéressants :

- les contraintes prises en compte sont relativement proches de notre problème : les contraintes de fenêtre de temps, les plannings des chauffeurs, l'utilisation des véhicules liée à l'accessibilité de certains sites, les durées de déchargement prises en compte ;
- la taille des instances (de 45 à 70 demandes) est très comparable à la taille de nos instances ;
- les critères de performances sélectionnés sont très similaires à ceux que nous proposons.

Malgré ces points positifs, certaines contraintes de notre problème ne sont pas prises en compte.

Nous avons proposé un processus de résolution qui permet de déterminer les meilleurs plannings possibles pour les chauffeurs dans le but de réaliser l'ensemble des activités. Ce processus de résolution est composé de trois étapes :

- A. L'évaluation par simulation du nombre maximal de chauffeur nécessaire pour réaliser l'ensemble des activités de transport du jour comportant le plus grand nombre d'activités,
- B. La construction par la résolution d'un modèle linéaire du planning journalier de chaque chauffeur,
- C. L'affectation et l'ordonnancement des activités en utilisant le couplage métaheuristique - modèle de simulation présenté dans le Chapitre 3.

Nous avons utilisé ce processus de résolution sur quelques instances du CHU, ce qui nous a permis de proposer différentes solutions au responsable. Ainsi pour une instance de 61 activités, nous avons obtenu des solutions admissibles avec un effectif réduit de 8 chauffeurs. Nous avons constaté que l'ensemble des plannings testés pour un effectif important ont abouti à des solutions admissibles et le nombre diminue rapidement jusqu'à obtenir aucune solution admissible avec 7 chauffeurs. L'une des solutions obtenues avec 8 chauffeurs a été mise en œuvre en mars 2010.

Chapitre 5 Outil d'aide à la décision

1. Introduction

Afin d'aider les responsables du CHU à mettre en place une organisation des transports pour chaque phase, nous avons proposé un outil d'aide à la décision. Cet outil doit leur permettre :

- d'évaluer une organisation des transports donnée, c'est-à-dire une répartition des activités entre les chauffeurs et pour chaque chauffeur l'ordre dans lequel il doit réaliser ses activités ;
- de déterminer une organisation des transports pour un nombre de chauffeurs donné qui respecte l'ensemble des contraintes, qui assure la réalisation de toutes les activités et qui minimise les retards et les heures supplémentaires (Chapitre 3) ;
- de dimensionner le nombre de chauffeurs, déterminer les plannings et une organisation des transports (Chapitre 4).

Pour la construction de cet outil, nous avons procédé par étape :

- Recueil des données : il s'agit de recueillir l'ensemble des éléments, paramètres et contraintes auxquels est soumis l'outil à concevoir ;
- Hiérarchisation des informations : il s'agit de trier, vérifier, valider et prioriser les informations collectées sur le terrain, le plus souvent cette étape concerne la conception du cahier des charges ;
- Conception de la boîte noire : cette boîte est le cœur de l'outil qui permettra de donner des solutions aux responsables en adéquation avec les caractéristiques décrites dans le cahier des charges ;
- Conception des interfaces qui permettront de piloter la boîte noire et de visualiser la qualité des solutions qu'elle fournira.

Cet outil d'aide à la décision est composé de deux interfaces : le modèle d'entrée qui permet le pilotage de l'outil et un modèle de résultats qui permet de visualiser, contrôler et valider les résultats obtenus.

Dans ce chapitre, nous commençons par présenter le recueil des données permettant d'alimenter l'outil, puis l'application avec son architecture, son cahier des charges et ses différentes interfaces (données et résultats), puis nous présentons l'application dans le cadre d'un exemple concret et d'un retour sur expérience pour l'organisation mise en place.

2. Recueil des données

Cette phase nous a permis de rencontrer l'ensemble des acteurs de la chaîne concernée par les transports. Nous avons travaillé en collaboration avec le directeur du service Economique et Logistique, les responsables de la blanchisserie, de la restauration, de la zone de transit et des unités de soins. De nombreuses réunions ont été nécessaires pour recueillir l'ensemble des informations utiles. Outre les réunions, nous avons utilisé d'autres méthodes pour comprendre le système étudié :

- Suivi de poste : le suivi de l'activité des chauffeurs avec l'enregistrement des horaires de passage à chaque site et les activités réalisées par les chauffeurs ;
- Questionnaires : afin de récolter les durées des différentes activités réalisées autour des produits consommés dans les unités de soins ;

- Suivi des produits : le suivi de la préparation des produits, leur consommation et le retour des contenants utilisés au site de production.

A partir des informations recueillies sur le terrain, des comptes rendus détaillés ont été envoyés aux différents acteurs afin de valider les informations. Les questionnaires ont été renvoyés avec un taux de retour de 76%, soit 37 réponses pour 49 questionnaires envoyés sur le site de l'hôpital Gabriel Montpied (GM). Par exemple, pour les repas, nous avons consulté les unités de soins de GM afin de déterminer les différentes durées du traitement des repas dans chaque unité de soins :

- Vérification des plateaux repas reçus : compatibilité entre les repas confectionnés et les régimes alimentaires de chaque patient ;
- Distribution des repas : cette phase concerne la distribution des plateaux repas à chaque patient ;
- Prise des repas : durée consacrée à la prise des repas par les patients ;
- Collecte des plateaux : une fois les repas consommés les plateaux sont récupérés pour être placés dans les contenants ;
- Heures de prise de repas pour le midi et le soir.

Ainsi, nous avons pu récolter les informations nécessaires pour l'ensemble des types de produits à savoir les heures de consommation, les différentes durées de traitement... au terme de ces nombreuses récoltes d'information, nous avons construit une base de données synthétisant toutes les informations disponibles.

3. Présentation de l'application

L'ensemble des étapes de la construction d'un outil d'aide à la décision passe par des phases de réunions, de rencontres et de validation. Aussi, nous allons nous intéresser à la conception du cahier des charges, à l'ensemble des interfaces en relation entre les responsables du CHU et à la « boîte noire » (couplage programme linéaire-métaheuristique-modèle de simulation).

3.1. Cahier des charges

L'outil que nous avons construit s'articule autour de grands thèmes : l'organisation des activités de transport, le respect des dates de livraison et l'utilisation des ressources. En ce qui concerne l'organisation des activités de transport, les principales questions soulevées sont :

- Quelle organisation doit être mise en œuvre afin de réaliser l'ensemble des activités de transport avec les ressources disponibles ?
- Dans quel ordre doit-on réaliser les activités afin qu'elles soient toutes réalisées ?

Pour le respect des heures de livraisons, l'analyse des informations données par l'outil doit permettre de répondre aux questions suivantes :

- L'organisation envisagée remet-elle en cause les heures de livraisons sur les sites de consommation ? Doit-on négocier un retard éventuel avec les unités de soins ? Les agents des transports internes peuvent-ils assurer une livraison à l'heure malgré le retard ?
- L'organisation permet-elle de livrer les contenants sales à l'heure afin de pouvoir préparer les produits pour la prochaine livraison de produits sur les sites de consommation ? Autrement dit, doit-on envisager de remettre en cause les plannings d'ouverture des sites de production ?

Pour l'utilisation des ressources, les questions à prendre en compte sont les suivantes :

- Y a-t-il suffisamment de ressources pour assurer la réalisation de l'ensemble des activités de transport ?
- Les chauffeurs auront-ils des heures supplémentaires à faire ?
- Quel est le taux d'occupation des quais des différents sites ? Quelles sont les heures où les responsables des sites pourront faire venir des transporteurs extérieurs au CHU sans gêner le passage des véhicules du service des transports externes ?

Afin de pouvoir construire les organisations les plus réalistes possibles, nous avons pris en compte un certain nombre d'éléments :

- Les activités sont définies avec les sites origines et destinations, les dates de début au plus tôt, les dates de fin au plus tard, les ressources nécessaires pour leur réalisation ;
- Les chauffeurs dont leur disponibilité est définie selon des plannings de travail, sont en nombre limité ;
- Le nombre de chaque type de véhicule disponible au dépôt ;
- Le nombre de chaque type de ressources propres aux sites : le nombre de quais de chargement, de déchargement et pour les sites de production, le nombre de lignes de production et d'aires de nettoyage ;
- Les plannings d'ouverture des lignes de production et des aires de nettoyages.

Une fois l'ensemble de ces éléments identifiés, quantifiés, validés et organisés, nous avons construit un outil qui permet de répondre à l'ensemble de ces interrogations. Nous allons donc commencer par décrire les fonctionnalités de cet outil.

3.2. Fonctionnalités

Par conséquent, les principales fonctionnalités qui composent l'outil sont :

- L'évaluation d'une solution donnée par le responsable en donnant la valeur des critères comme le nombre d'activités non réalisées, le retard cumulé et le nombre d'heures supplémentaires ;
- L'optimisation de la solution en tenant compte des données (nombre de chauffeurs disponibles avec leur plannings de travail, le nombre de véhicules de chaque type,...) ;
- Le dimensionnement du nombre de chauffeurs et la construction de leurs plannings en fonction d'un nombre d'activités de transport à réaliser ;
- La mise en forme du résultat obtenu à l'aide de diagrammes et de tableaux de bord dédiés à chaque ressource utilisée : véhicule, chauffeur, quai, ligne de production...

Nous allons maintenant présenter en détail l'architecture de l'outil d'aide à la décision que nous proposons aux responsables du CHU.

3.3. Architecture

L'outil est conçu de manière à ne laisser aux responsables qu'un accès limité aux données et aux résultats. En effet, les éléments constituant le cœur de cette application ne sera pas accessible. Ainsi, nous présentons l'architecture de notre outil dans la Figure 84 où les seuls éléments accessibles aux responsables sont signalés en zones blanches, les zones grisées étant inaccessible.

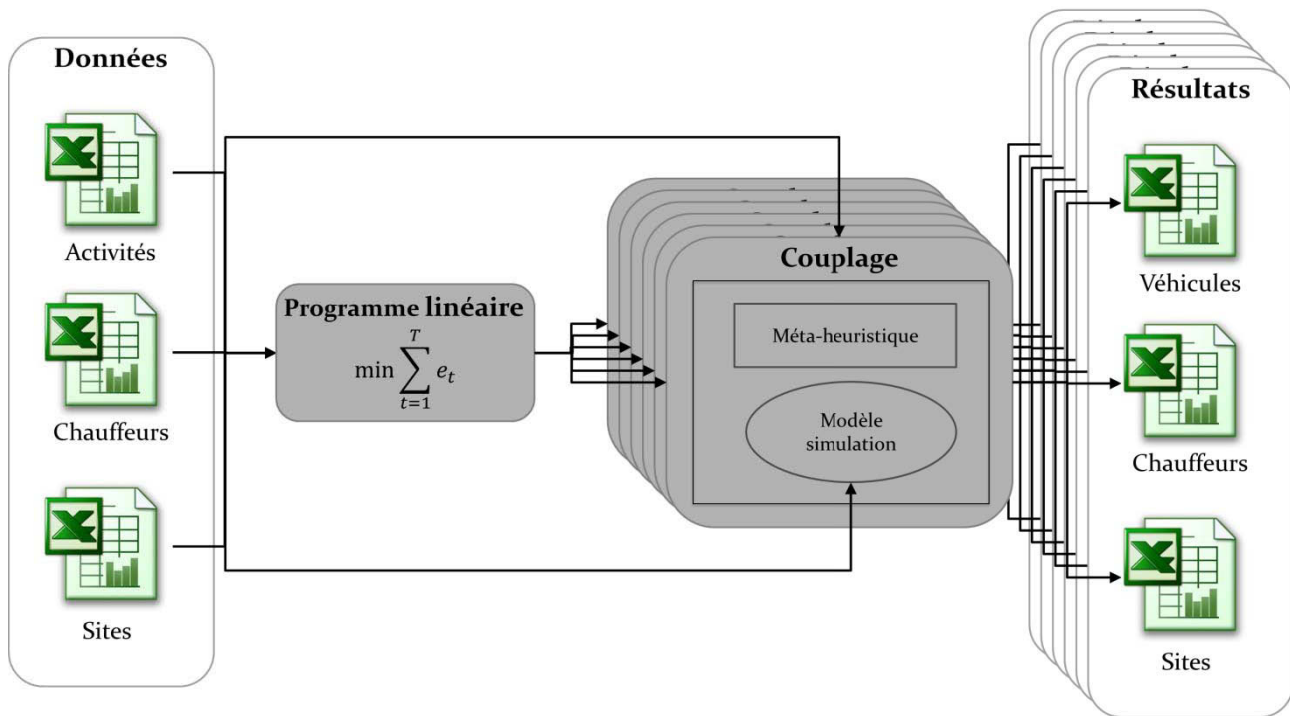


Figure 84 : Schéma général de l'application

Les responsables étant formés à l'utilisation d'Excel ont souhaité avoir une interface facilement manipulable. C'est pourquoi les interfaces contenant les données et les résultats sont créées à l'aide de fichiers Excel. L'interface d'entrée contient tous les éléments de description des activités de transports à organiser, les horaires des plannings de travail des chauffeurs, la structure de chaque site (nombre de quais, de ligne de production, d'aire de nettoyage,...) et les temps de transports entre les sites. L'interface de sortie est organisée par type de ressources : un tableau de bord, des diagrammes de Gantt permettent de visualiser l'utilisation de chaque ressource et de donner des informations à chaque acteur de la chaîne logistique hospitalière.

La « boîte noire » ou couplage programme linéaire-métaheuristique-modèle de simulation a été présentée en détail dans les chapitres précédents. Nous commencerons donc avec la présentation de la construction du modèle d'entrée ou de paramétrage de l'outil et enfin avec la mise au point du tableau de bord (modèle de résultats).

3.4. Modèle d'entrée ou de paramétrage

Cette phase concerne exclusivement un seul type d'acteur, les responsables des transports. Lors des réunions de travail, nous nous sommes focalisés sur la lisibilité des informations et les possibilités de paramétrer les horaires de travail des chauffeurs, les détails des activités de transport et la sélection des activités de transports à organiser. Nous avons donc travaillé par étapes, avant de faire une validation globale de l'interface.

Les responsables ont demandé de présenter les informations avec une grande lisibilité. Nous nous sommes attachés aux données qui concernent les activités de transport (Figure 85).

Numéri	Activités	Origine	Destination	Date au plus tôt	Type Camion	Date souhaitée	Prédécesseur
47	RCS	SteMarie	Blanch	12:00	Ca_norm		
48	DCP	Blanch	NHE	06:30	Ca_norm	13:20	
49	DCP	Blanch	NHE	06:30	Ca_norm	14:30	
50	RCS	NHE	UCP	13:00	Ca_Frigo		25
51	RCS	GM	UCP	13:00	Ca_Iso_gd		26
52	RCS	GM	UCP	13:00	Ca_Iso_gd		27
53	RCS	NHE	UCP	13:00	Ca_Frigo		28
54	RCS	GM	UCP	13:00	Ca_Iso_gd		29
55	RCS	Clem	Blanch	13:30	Ca_norm		
56	DCP	Blanch	Clem	06:30	Ca_norm	14:15	
57	DCP	Blanch	GM	06:30	Ca_norm	14:15	
58	RCS	NHE	Blanch	10:45	Ca_norm		
59	RCS	NHE	Blanch	14:00	Ca_norm		

Figure 85 : Description des activités

Pour chaque activité, nous renseignons un numéro d'identification, un type, une origine, une destination, une date de début au plus tôt, le type de véhicule à utiliser pour le transport et éventuellement une date de fin souhaitée, un numéro de prédécesseur et le type de contenant utilisé. Ainsi, le responsable peut vérifier les informations nécessaires pour la réalisation des activités. Le recueil et la validation des activités de transport a été l'étape la plus longue.

Structure							Durees Traitement (min)								Planning ouverture des lignes de remplissage											
Sites	Quai	Dec	Quai	Chgt	Lig	Remp	Aire	Nett	Sites	Lig	Remp	Quai	Dec	Quai	Chgt	Aire	Nett	Conso	Sites	HDM	HFM	HDS	HFS			
Blanch	1		2			7		1	Blanch	15	10	10		10		25		1440	Blanch	06:30		11:30		12:00		16:00
Sterili						2		2	Sterili	120	10		10		10		25		180	Sterili	06:00					22:00
UCP	1		2			2		1	UCP	30	10	10		10		40		140	UCP	08:45		12:00		15:00		17:00
Pharma						2		1	Pharma	200	10		10			0		1440	Pharma	07:00		12:00		12:30		16:00
GM	1		1						GM			10		10					CRHD	07:00		12:00		12:30		17:00
NHE			2			2			NHE			10		10												
HN	1		1						HN			10		10												
CIS	1		1						CIS			10		10												
Clem	1		1			1			Clem			10		10												
CMP	1								CMP			10		10												
CHRI	1								CHRI			10		10												
TroisC	1		1						TroisC			10		10												
SAMU	1		1						SAMU			10		10												
UCSA	1		1						UCSA			10		10												
Hem	1								Hem			10		10												
EHPAD									EHPAD																	
CRHD	1					2		1	CRHD	30	10		10			30		140								

Figure 86 : Nombre de ressources, durée de traitement et planning d'ouverture

Un autre point important du paramétrage concerne la structure des sites (Figure 86). Nous avons également renseigné l'ensemble des informations concernant le nombre de quais de chargement et de déchargement par site visité. Certains sites n'ont pas de quai, c'est le cas de la stérilisation et de la pharmacie. Ces deux unités sont en fait situées sur le site de l'hôpital GM, par conséquent seuls les quais de GM sont renseignés. D'autres sites ont juste un quai de chargement, cela signifie que ces sites n'ont qu'un seul quai pour effectuer les deux activités : chargement et déchargement. Nous renseignons également le nombre de lignes de production et d'aires de nettoyage par site de production. Le tableau intitulé « Durées Traitement » indique les durées de traitement des différentes étapes des activités de transport : le remplissage, le nettoyage et la consommation. Lorsque la durée de consommation dure 1440 minutes, cela signifie que le contenant reste 24h dans l'unité de soins. Le dernier tableau indique les plages horaires d'ouverture des sites de production. Ainsi la blanchisserie est ouverte de 6h30 à 16h avec une fermeture entre 11h30 et 12h. La stérilisation reste ouverte 6h et 22h sans interruption.

	Plage de travail 1	Plage de travail 2	Plage de travail 3	Plage de travail 4	Plage de travail 5	Plage de travail 6	Plage de travail 7	Plage de travail 8
Ouverture	1	1	1	1	1	1	1	1
Heure Début	06:00	12:30	06:00	12:30	08:00	12:30		
Heure Fin	12:00	14:00	12:00	14:00	12:00	16:00		
	Activités							
	1	21	22	23	31	34	36	37
	2	55	77	58	42			
	3	56	78	60	44			
	4	57		61	47			
	5			62				
	6			71				
	12			72				
	13							

Figure 87 : Présentation de l'activité des chauffeurs

Une fois les informations complétées sur les activités renseignées et les données sur les sites données, une autre partie concernant la répartition des activités entre les chauffeurs reste encore à renseigner (Figure 87). Pour chaque chauffeur, nous renseignons l'ouverture du planning (1 pour le travail, 0 sinon), leurs horaires de travail (heure de début et de fin) et la liste des activités qui leur sont affectées. De plus, nous avons mis en place la possibilité de vérifier qu'il n'y ait pas de doublons (numéros d'activité). Cette partie permet de construire le vecteur solution que nous évaluons avec le modèle de simulation ().

1	2	3	4	5	6	12	13	21	...	57	...
---	---	---	---	---	---	----	----	----	-----	----	-----

Figure 88 : Vecteur solution obtenu à partir de la répartition des activités par plage de travail

Une fois l'ensemble des paramètres saisis et validés, le modèle de simulation ou la « boîte noire » évalue la solution paramétrée.

3.5. Modèle de résultats

L'analyse des résultats ne pourra être réalisée dans de bonnes conditions que si les informations nécessaires sont renseignées. Les responsables des transports sont soucieux d'identifier chaque activité réalisée par les chauffeurs. Cette étape ne concerne pas uniquement les responsables des transports mais également l'ensemble des acteurs de la chaîne. Cette étape a nécessité de rencontrer les acteurs de nombreuses fois afin de repérer et déterminer les indicateurs que souhaitaient visualiser les différents responsables.

Un certain nombre de réunions a été nécessaire pour collecter les informations pour la conception des différents tableaux, valider ces critères et enfin lire et analyser les résultats obtenus avec l'outil d'aide à la décision. D'autres réunions ont été nécessaires afin de procéder à différents tests que les responsables souhaitaient faire à la suite de l'analyse des résultats. Par conséquent, l'outil est très utilisé pour effectuer un travail de validation des solutions et convaincre les différents acteurs de la difficulté de procéder à quelques modifications mineures sans avoir des impacts lourds sur la réalisation des activités.

Afin de présenter les résultats aux responsables des transports, nous avons créé un certain nombre de diagrammes et de tableaux. Les diagrammes de Gantt permettent de visualiser l'enchaînement des activités ainsi que les moments d'inactivité des chauffeurs (Figure 89).

	06:00	06:05	06:10	06:15	06:20	06:25	06:30	06:35
Plage de travail 1	TrsptAVIDe_16			Chargement_16	Chargement_16	Transport_16	Dechargement_16	Dechargement_16
Véhicule	4			4	4	4	4	4
Etape	Depot->CIS			CIS.QC(1)	CIS.QC(1)	CIS->UCP	UCP.QD(1)	UCP.QD(1)
Plage de travail 2	TrsptAVIDe_7	TrsptAVIDe_7	TrsptAVIDe_7	TrsptAVIDe_7	TrsptAVIDe_7	TrsptAVIDe_7	Chargement_7	Chargement_7
Véhicule	9	9	9	9	9	9	9	9
Etape	Depot->CHRI	Depot->CHRI	Depot->CHRI	Depot->CHRI	Depot->CHRI	Depot->CHRI	CHRI.QC(1)	CHRI.QC(1)
Plage de travail 3	TrsptAVIDe_5			Chargement_5	Chargement_5	Transport_5		
Véhicule	1			1	1	1		
Etape	Depot->GM			GM.QC(1)	GM.QC(1)	GM->UCP		
Plage de travail 4								
Véhicule								
Etape								
Plage de travail 5								
Véhicule								
Etape								
Plage de travail 6	TrsptAVIDe_14	TrsptAVIDe_14	TrsptAVIDe_14	Chargement_14	Chargement_14	Transport_14	Transport_14	Transport_14
Véhicule	8	8	8	8	8	8	8	8
Etape	Depot->NHE	Depot->NHE	Depot->NHE	NHE.QC(1)	NHE.QC(1)	NHE->Blanch	NHE->Blanch	NHE->Blanch

Figure 89 : Diagramme d'activité des chauffeurs

Ce diagramme permet de visualiser par tranche de 5 minutes l'activité des chauffeurs de 6h à 6h35. Prenons le chauffeur travaillant selon la plage de travail 2, celui-ci effectue un trajet à vide entre le dépôt et l'hôpital de Riom (CHRI) avec le véhicule 9 pour aller chercher du linge sale comme le stipule l'activité 7. Arrivé au CHRI, le chauffeur charge le linge. Une fois chargé, le chauffeur ramène le contenant à la blanchisserie.

Nous avons aussi prévu un diagramme à destination des responsables des agents situés aux quais de chargement et de déchargement des différents sites (Figure 90).

Site	Quai	6:00	6:05	6:10	6:15	6:20	6:25	6:30	6:35	6:40	6:45	6:50
GM	Chgt 1				Repas	Repas					Repas	Repas
	Dchgt 1											
NHE	Chgt 1				Repas	Repas						
	Chgt 2				Repas	Repas						
	Dchgt 1											
	Dchgt 2											
UCP	Chgt 1											
	Chgt 2											
	Dchgt 1							Repas	Repas		Repas	Repas
HN	Chgt 1											
	Dchgt 1											
CMP	Chgt 1											
	Dchgt 1											
CIS	Chgt 1											
	Dchgt 1											
CHRI	Chgt 1							Linge	Linge	Linge	Linge	
	Dchgt 1											Linge

Figure 90 : Diagramme d'utilisation des quais des différents sites

Ce diagramme permet de visualiser l'utilisation des quais entre 6h et 6h50. Nous avons conservé le même code couleur que précédemment : zone gris foncé pour le chargement et zone grisée pour le déchargement. Pour chaque activité sur un quai, nous signalons le type de produit concerné (linge ou repas).

En termes de tableau de bord, nous en avons conçu plusieurs qui permettent de mettre en évidence la qualité de la solution. Nous proposons d'abord un tableau qui récapitule l'activité des chauffeurs en fonction du type de produit traité (Tableau 59).

	Tps activité Repas	Tps activité Linge	Tps activité Médicaments	Tps attente	Heures Supp	Taux d'occupation
Ch. 1	4h40	1h30	0h00	0h50	0h00	82,2%
Ch. 2	5h00	0h55	0h00	0h40	0h15	78,9%
Ch. 3	4h05	2h45	0h20	0h30	0h45	91,1%
Ch. 4	...	...	...	...	...	...

Tableau 59 : Récapitulatif des activités des chauffeurs

Pour chaque chauffeur, nous donnons le temps qu'il a passé à faire des transports de repas, de linge et de médicaments (ce temps inclut les durées de transport, de chargement et de déchargement), le temps d'attente des chauffeurs sur les sites visités (quai de chargement ou de déchargement utilisé par une autre ressource ou contenants en cours de remplissage) et le nombre d'heures supplémentaires effectuées.

Eléments	Critères	Valeurs
Activités	Nombre d'activité non réalisée	1
Retard	Nombre d'activité en retard	5
	Retard total	01:05
	Retard moyen	00:13
	Retard maximum	00:20
	Retard minimum	00:05
	Retard écart type	00:05
Attente sur un quai	Durée totale d'attente sur un quai	00:00
	Durée moyenne d'attente sur un quai	00:00
	Durée maximum d'attente sur un quai	00:00
	Durée minimum d'attente sur un quai	00:00
	Ecart type d'attente sur un quai	00:00
Attente dans le véhicule	Durée totale d'attente dans le véhicule	00:40
	Durée moyenne d'attente dans le véhicule	00:10
	Durée maximum d'attente dans le véhicule	00:10
	Durée minimum d'attente dans le véhicule	00:10
	Ecart type d'attente dans le véhicule	00:00

Tableau 60 : Récapitulatif des retards et attentes

Les responsables souhaitaient avoir dans un tableau, l'ensemble des critères qui permettent de visualiser rapidement la qualité de la solution.

4. Application sur une instance

Nous avons utilisé notre outil pour construire l'organisation des transports pour l'ensemble des phases que nous avons identifiées dans le Chapitre 1. Nous avons proposé pour chaque phase plusieurs solutions. Les responsables ont mis en œuvre une solution parmi les organisations proposées. Nous avons sélectionné une instance en particulier car elle est composée d'un nombre important

Pour relier les différents sites, une matrice de durées de transport a été construite comme suit :

Sites	Dépôt	Blanch	Sterili	UCP	Pharma	GM	NHE	HN	CIS	Clem	CMP	CHRI	SteMarie	CRHD
Dépôt	0	25	5	0	5	5	15	25	5	15	5	30	10	10
Blanch	25	0	25	1000	25	25	15	10	25	25	25	15	20	20
Sterili	5	25	0	1000	0	0	15	25	5	15	5	30	10	10
UCP	0	1000	1000	0	1000	5	15	25	5	15	5	30	10	10
Pharma	5	25	0	1000	0	0	15	20	5	15	5	30	10	10
GM	5	25	0	5	0	0	15	25	5	15	5	30	10	10
NHE	20	15	20	20	20	20	0	20	20	35	20	25	15	15
HN	25	10	25	25	20	25	20	0	25	25	25	15	20	20
CIS	5	25	5	5	5	5	15	25	0	15	5	30	10	10
Clem	15	25	15	15	15	15	35	25	15	0	40	20	15	30
CMP	5	25	5	5	5	5	15	25	5	40	0	35	10	10
CHRI	30	15	30	30	30	30	25	15	30	20	35	0	20	30
SteMarie	10	20	10	10	10	10	15	20	10	15	10	20	0	10
CRHD	10	20	10	10	10	10	15	20	10	30	10	30	10	0

Tableau 61 : extrait de la matrice des durées de transports utilisée dans notre étude

Les véhicules sont dédiés aux transports de certains produits et ne peuvent donc effectuer les trajets entre l'UCPA et la blanchisserie, par exemple. Nous avons donc indiqué une durée très grande. Pour réaliser l'ensemble de ces activités, un certain nombre de ressources sont mis à disposition :

- Chauffeurs ;
- 4 véhicules réfrigérés, 4 véhicules standards ;
- Pour les transports de repas : 7 contenants (lots de chariots de remise à température) pour les sites de GM et HE et 5 contenants (lots de paniers) pour les autres sites ;
- Pour les transports de linge : 30 contenants (lots d'armoires) de linge ;
- Pour les transports de médicaments : 2 contenants (lots de rolls).

L'objectif de notre étude est de fournir une solution qui convienne pour l'ensemble des jours de la semaine, soit du lundi au dimanche. Nous avons utilisé notre outil et présenté les solutions aux responsables qui ont sélectionné puis validé une solution avant de la mettre en œuvre. Nous allons maintenant présenter cette solution.

4.1.2. Description de l'organisation mise en place

Pour résoudre le problème d'organisation des transports, nous avons utilisé notre outil qui a permis de sélectionner la solution qui convenait aux responsables. Voici les résultats que nous avons obtenus pour cette instance :

Nous avons proposé les solutions où les retards sont les moins importants, c'est-à-dire avec les solutions présentant 10 minutes de retard maximum et pas d'heures supplémentaires. La première sélection des solutions concernait : le type de produit en retard et le nombre d'activités touchées. Ainsi les responsables ont préféré les solutions où le retard ne portait que sur les activités de linge et si possible sur 2 activités (5 minutes de retard par activité). De plus, parmi l'ensemble des solutions proposées, les responsables en ont sélectionné une qui leur permettait de construire des postes de travail dédiés repas et médicaments et d'autres postes dédiés au transport du linge. Dans le cadre du retour d'expérience, nous allons surtout nous intéresser aux transports de repas et de médicaments.

Selon la solution sélectionnée par les responsables, les retards sont limités : 10 minutes de retard sur deux DCP de linge et aucune heure supplémentaire avec 8 chauffeurs. En ce qui concerne l'organisation du travail des chauffeurs, certains sont dédiés aux transports des repas et des médica-

ments et d'autres sont dédiés aux transports de linge. Les chauffeurs sont répartis sur les plannings suivants :

- 3 chauffeurs de 6h30 à 11h30 puis de 12h à 14h30,
- 3 chauffeurs de 9h à 12h puis de 12h30 à 17h,
- 2 chauffeurs de 10h à 12h30 puis de 13h à 18h.

4.2. Retour d'expérience

Les responsables du CHU ont décidé de mettre en œuvre l'organisation présentée dans le paragraphe précédent. Nous avons demandé aux chauffeurs de remplir des fiches de suivis afin de constater les éventuels retards. Les chauffeurs ont accepté de remplir ces fiches et nous disposons de 72 à 99 relevés, selon le remplissage des fiches effectué par les chauffeurs.

La principale préoccupation des responsables portaient essentiellement sur les transports liés à l'ouverture du nouvel hôpital, et plus particulièrement sur les transports de repas. Nous avons donc récapitulé les données recueillies dans le Tableau 62.

Horaires prévus	Activités	Nombre de relevés	Nombre de Retards constatés	Moyenne des retards	σ des retards
Retours des contenants sales le matin					
06:50	Arrivée à HE	99	7	00:06	00:05
07:20	Arrivée à la Cuisine relais	99	12	00:06	00:06
08:00	Arrivée à HE	92	2	00:08	00:07
08:30	Arrivée à la Cuisine relais	92	2	00:13	00:08
Livraison des contenants propres le matin					
09:25	Départ pour HE	99	89	00:11	00:07
09:55	Arrivée à HE	98	32	00:09	00:07
10:15	Départ pour HE	97	46	00:09	00:08
10:45	Arrivée à HE	97	34	00:10	00:10
Retour des contenants sales l'après-midi					
13:30	Arrivée à HE	80	1	00:15	00:00
13:50	Arrivée à la Cuisine relais	80	21	00:08	00:05
14:30	Arrivée à HE	72	2	00:11	00:06
14:50	Arrivée à la Cuisine relais	72	11	00:08	00:04
Livraison des contenants propres l'après-midi					
15:40	Départ pour HE	80	2	00:05	00:00
16:00	Arrivée à HE	78	0		
16:30	Départ pour HE	78	1	00:15	00:00
16:50	Arrivée à HE	78	6	00:11	00:05

Tableau 62 : Analyse des relevés effectués par les chauffeurs

Nous remarquons que les retards concernent exclusivement les livraisons de contenants propres pour les repas du midi. Les autres activités de la journée sont ponctuellement en retard (entre 0% et 26% des relevés) et les retards constatés sont limités. Les livraisons de contenants propres présentent un nombre de retards très importants, entre 33 et 90% des relevés. Les activités de retour des contenants sales du matin et de livraisons des contenants propres de l'après-midi ne présentent aucune difficulté particulière.

L'activité prévue à 9h25 est la plus touchée (90% des relevés) en présentant un retard de plus de 11 minutes en moyenne. Toutefois, pour l'activité de 9h25, 89 retards sont constatés alors que l'activité suivante (prévue à 9h55) n'a plus que 32 retards. Nous pouvons conclure que les chauffeurs arrivent à combler le retard entre le chargement des contenants propres et leur déchargement à l'HE. En revanche, lorsque des retards sont constatés pour l'activité prévue pour 10h15, les chauffeurs éprouvent beaucoup plus de difficultés à compenser les retards, parfois même les retards s'accroissent.

Nous remarquons également que les activités de transport de retour des contenants sales de l'après-midi présentent également un certain nombre de retards. Nous constatons que même si les chauffeurs partent à l'heure de l'HE, il y a quelque fois des retards arrivés à la cuisine relais de l'HD. Ces retards ont plusieurs origines :

- La circulation plus dense en centre-ville à cette heure de la journée entraîne des durées de transports un peu plus importantes ;
- L'accès au quai de déchargement de la cuisine relais de l'HD est parfois encombré par le stationnement d'ambulances interdisant au véhicule de se mettre à quai.

La variation du nombre de retards, qu'ils soient absorbés, c'est-à-dire que les durées de trajet permettent de compenser un retard au départ, ou qu'ils soient accentués ou provoqués, c'est-à-dire que les durées de trajet sont plus importantes que prévues, met en évidence la variation de la durée de transport en fonction de l'heure de la journée. En effet, la densité de la circulation dans le centre-ville est plus importante à certaines heures de la journée (entre 7h30 et 8h30 et entre 10h et 14h). Cette variation de la durée de transport n'est pas prise en compte dans notre démarche à l'heure actuelle, mais pourrait constituer une perspective intéressante.

5. Conclusion

Un outil d'aide à la décision doit donner tous les éléments nécessaires à la prise de décision. Quel que soit le contexte, le système étudié ou la problématique soulevée par les responsables de l'entreprise, de nombreuses informations doivent être collectées, triées, agencées, afin de prendre en compte le problème dans son ensemble.

L'ensemble des phases de conception d'un outil d'aide à la décision sont très importantes et nécessite de travailler en collaboration avec l'ensemble des acteurs concernés par l'étude. Les rencontres sont nécessaires afin de faire participer les acteurs à l'élaboration de chaque phase et ainsi de les former à l'utilisation de cet outil.

Nous avons suivi cette démarche auprès des différents acteurs hospitaliers et chaque phase a nécessité de nombreuses heures de travail sur le terrain. Entre les réunions, les suivis de postes ou de produits, les différents éléments se sont mis en place pour aboutir à l'outil que nous avons présenté : un modèle d'entrée ou paramétrage permettant de renseigner les données, un modèle de résultats comprenant un certain nombre de diagrammes et de critères de performances.

Cet outil a permis de mettre au point des organisations pour les transports des différents produits entre les différents sites de l'hôpital. Les différentes organisations ont été mises en œuvre en fonction de l'avancement des constructions et des transferts.

Conclusion générale

Le contexte hospitalier connaît de plus en plus de problèmes où la recherche opérationnelle peut trouver aisément sa place. De nombreuses problématiques ont déjà fait l'objet de travaux sur des sujets très divers : planification des blocs opératoires, gestion des ressources humaines dans les unités de soins, gestion des stocks, ... Le CHU de Clermont-Ferrand nous a proposé une étude sur la réorganisation des transports de linge, de repas et de médicament. L'objectif de cette thèse était de répondre à une double problématique : industrielle et scientifique autour d'un problème de transport avec contraintes de ressources.

La problématique industrielle s'intéresse à la réorganisation des activités de transport de repas, de linge et de médicament entre les sites de productions et les unités de consommation. L'objectif était, pour chaque phase de réorganisation du CHU, de dimensionner la flotte de véhicules et le nombre de ressources humaines nécessaires et de construire les plannings de travail avec la liste ordonnée des activités à réaliser pour chaque chauffeur.

La problématique scientifique proposée concerne les problèmes de transport de type « Pickup and Delivery » avec contraintes de fenêtres de temps, contraintes de charge complète et contraintes de ressources. Les propositions se basent sur la notion de couplage de méthodes et de modèles.

Afin de répondre aux diverses problématiques industrielles, notre démarche a été la suivante :

- Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés au problème de transport d'un seul type de produit. Une analogie a été faite avec les problèmes d'ordonnancement avec contraintes de ressources pour un seul type d'activité de transport (distribution de contenant propre ou retour de contenant sale), et un modèle mathématique minimisant le retard a été proposé. Puis, pour prendre en compte les deux types d'activité, un parallèle avec les problèmes d'ordonnancement avec temps de montage dépendant de la séquence a permis de compléter le modèle mathématique précédent. Les deux modèles ont été mis en œuvre sur des instances du CHU et ont permis de cerner la problématique liée à l'utilisation des nombreuses ressources nécessaires (chauffeur, véhicule, quai de chargement / déchargement, contenant, ligne de production, aire de nettoyage, planning journalier...);
- Dans un second temps, nous nous sommes intéressés au problème de transport de tous les types de produits. Ce problème présente une double complexité : une complexité structurelle et fonctionnelle liées aux nombreuses contraintes à gérer et une complexité liée au problème d'affectation des activités aux chauffeurs et à leur ordonnancement. Pour répondre à cette double complexité, nous avons proposé un couplage entre un modèle de simulation et une recherche locale itérée. Deux systèmes de voisinage ont été proposés. Les résultats ont montré que le système de voisinage utilisant conjointement l'insertion et la permutation fonctionne mieux que celui utilisant seulement l'insertion. Cependant, les résultats ont également mis en évidence la nécessité de travailler sur les plannings journaliers des chauffeurs et donc de remettre en cause ceux imposés par le CHU ;
- Pour finir, le traitement de la problématique complète : détermination des plannings journaliers des chauffeurs, affectation des activités aux chauffeurs et ordonnancement, a permis de proposer un processus itératif mettant en œuvre plusieurs couplages entre un modèle mathématique, deux modèles de simulation (l'un à capacité infinie et l'autre à capacité finie) et une recherche locale itérée. Ce processus a été mis en œuvre dans un outil d'aide à la déci-

sion qui a permis de répondre à la problématique à chaque phase de modification du chu et permettra de répondre aux futures modifications.

Les résultats présentés dans cette thèse ont été validés et mis en application, lors des différentes phases de la réorganisation du CHU de Clermont-Ferrand.

D'un point de vue scientifique, les perspectives concernant ces travaux sont nombreuses :

- améliorer le déroulement du modèle de simulation pour accélérer sa vitesse d'exécution,
- utiliser le graphe de précedence construit dans le modèle de simulation comme base pour comparer deux solutions et pour proposer d'autres systèmes de voisinage en s'appuyant sur la notion de chemin critique,
- réduire l'espace de recherche en réalisant des prétraitements sur les dates de début au plus tôt et les dates de fin souhaitées.

De nombreuses perspectives peuvent également être explorées pour améliorer la prise en compte des contraintes liées à la réalité du terrain :

- intégrer dans le modèle de simulation les durées de trajet variables en fonction de la période de la journée,
- intégrer les notions de chauffeurs dédiés et chauffeurs polyvalents lors de la construction des plannings journaliers,
- proposer des scénarios de secours dans le cas où une ressource ou plusieurs ressources tombent en panne, ce qui permettrait de prendre en compte des aléas comme les pannes de véhicules, de lignes de production ou encore l'absentéisme...

A plus long terme, une étude sur l'organisation de l'acheminement des produits depuis les quais des sites jusque dans les unités de soins et le retour des contenants sur les quais pour retour aux sites de production pourrait faire l'objet d'une étude complète. En effet, des agents assurent l'acheminement des contenants depuis les quais jusque dans les unités de soins à l'aide de tracteur et de monte-charge. Les agents se partagent le travail, certains assurent le mouvement « horizontal » des contenants des quais aux portes de monte-charges, tandis que les autres assurent les déplacements « verticaux » des contenants du sous-sol aux unités de soins situées dans les étages.

Ainsi, la volonté de prendre en compte l'ensemble des flux de produits depuis les sites de production jusqu'aux unités de soins dans les sites hospitaliers, peut constituer une nouvelle étape à franchir. En effet, la possibilité de gérer l'ensemble de la chaîne logistique concernant les flux de produits est un enjeu intéressant pour le responsable du service logistique, qui aurait ainsi une vision globale de son système. La principale difficulté de ce problème réside dans le nombre de données à gérer et le nombre de contraintes qu'implique la gestion de l'ensemble de ces flux.

Bibliographie

- Abouïssa, H., Nicolas, J., Benasser, A., & Cherkouk, N. (2003). Système Multi Agent et réseaux de Petri pour la modélisation et l'Evaluation des Performances des Systèmes hospitaliers. *1ère conférence francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers (GISEH)*. Lyon.
- Aldaihani, M., & Dessouki, M. (2003). Hybrid scheduling methods for paratransit operations. *Computers & Industrial Engineering*, 45, pp. 75-96.
- Aleksy, B., André, V., Fenies, P., Gourgand, M., & Rodier, S. (2006). Modélisation et simulation des flux logistiques du Nouvel Hôpital Estaing. *Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers GISEH*.
- Aleksy, B., Chabrol, M., Chauvet, J., & Fenies, P. (2006). Le projet de modélisation et de simulation des flux du Nouvel Hôpital Estaing : Aide à la décision vs management du changement. *MOSIM'06*, 2, pp. 1457-1466. Rabat.
- Alfa, A. S. (1986). Scheduling of vehicles for transportation of elderly. *Transportation planning and technology*, 11(3), pp. 203-212.
- Andre, V., Grangeon, N., Norre, S., & Philippe, F. (2009, Février). Dimensionnement et ordonnancement de livraisons de repas. *Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision ROADEF'09*. Nancy.
- Andre, V., Grangeon, N., Norre, S., & Philippe, F. (2010). Un problème de transport dans un environnement hospitalier modélisé par un PDP-TW à contraintes de ressources. *Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers*.
- Andre, V., Grangeon, N., Norre, S., & Philippe, F. (2011). A combination metaheuristic-simulation for solving a transportation problem in a hospital environment. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*.
- Audy, J.-F., D'Amours, S., & Rousseau, L.-M. (2007, juin 10-15). Collaborative planning in a log truck pickup and delivery problem. *Tristan VI Sixth Triennial Symposium on transportation Analysis*.
- Aykin, T. (1996). Optimal shift scheduling with multiple break windows. *Management Science*, 42(4), pp. 591-602.
- Aykin, T. (2000). A comparative evaluation of modeling approaches to the labor shift scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 125, pp. 381-397.
- Baita, F., Pesenti, R., Ukovich, W., & Favaretto, D. (2000). A comparison of different solution approaches to the vehicle scheduling problem in a practical case. *Computers & Operations Research*, 27, pp. 1249-1269.
- Banerja-Brodeur, M., Cordeau, J.-F., Laporte, G., & Lasry, A. (1998). Scheduling linen deliveries in a large hospital. *Journal of the Operational Research Society*, pp. 770-780.

- Banerja-Brodeur, M., Cordeau, J.-F., Laporte, G., & Lasry, A. (1998). Scheduling linen deliveries in a large hospital. *Journal of the Operational Research Society*, pp. 770-780.
- Bard, J., & Purnomo, H. (2005). Preference scheduling for nurses using column generation. *European Journal of Operational Research (EJOR)*.
- Baugh, J., Khrishna, G., Kakivaya, R., & Stone, J. (1998). Intracatbility of a dial-a-ride problem and a multiobjective solution using simulating annealing. *Engeeniring Optimization*, 2, pp. 91-123.
- Beaudry, A., Laporte, G., Melo, T., & Nickel, S. (2006). *Dynamic transportation of patients in hospital*. Institut Techno- und Wirtschaftsmathematik.
- Beaulieu, M., & Patenaude, G. (2004). La gestion des approvisionnements en réseau : le cas du centre hospitalier Notre-Dame de la Merci. *Logistique & Management*, pp. 59-64.
- Betchold, S. E., & Jacobs, L. W. (1990). Implicit modeling of felxible break assignments in optimal shift scheduling. *Management Sciences*, 11(36), pp. 1339-1351.
- Blazewicz, J., Lenstra, J., & Rinnooy Kan, A. (1983). Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity. *Discrete Applied Mathematics*, 5(1), 11-24.
- Blouin, J.-P., Beaulieu, M., & Landry, S. (2001). Système de réapprovisionnement des unités de soins : description et implications organisationnelle. *Logistique & Management*, 9(2), pp. 43-53.
- Boutevin, C. (2003). *Problème d'ordonnancement et d'affecation avec contraintes de ressources de type RCPSP et line balancing*. Thèse de doctorat, Clermont-Ferrand.
- Boutry, M. (2005). *Construction d'indicateurs*. Nancy.
- Brandão, J., & Mercer, A. (1997). A tabu search algorithm for the multi-trip vehicle routing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 180-191.
- Brigl, B., Ammenwerth, E., Dujat, C., Gräber, S., Grosse, A., Häber, A., et al. (2004). Preparing strategic information management plans for hospitals : a practical guideline SIM plans for hospital : a guideline. *International Journal of Medical Informatics*.
- Burns, D. M., & Tucker, S. (2001). Inventory analysis of a pediatric care center. *Hospital Material Quaterly*(22), pp. 84-91.
- Caris, A., & Janssens, G. (2009). A local search heuristic for the pre- and end-haulage of intermodal container terminals. *Computers & Operations Research*, 36, pp. 2763-2772.
- Chabrol, M., Chauvet, J., Fenies, P., & Gourgand, M. (2006). A methodology for process evaluation and activity based costing in health care supply chain. *Lecture Notes in Computer Sciences (Springer) as a special issue of ENEI*, 3812, 375-384.
- Chauvet, J. (2009). *Une méthodologie de modélisation pour les systèmes hospitaliers : application sur le Nouvel Hôpital Estaing*. Thèse de doctorat, Clermont-Ferrand.
- Chauvet, J., Dessomes, N., Durand, N., & Quinkal, A. (2005). *Un modèle de connaissance pour le Nouvel Hôpital Estaing*. Projet Opérationnel de DESS, Clermont-Ferrand.

- Chow, G., & Heaver, T. D. (1994). Logistics in Canadian healthcare industry. *Canadian Logistics Journal*, 1(1), pp. 29-73.
- Clark, G., & Wright, J. (1963). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 11, pp. 568-581.
- Colorni, A., Dorigo, M., Maffioli, F., Maniezzo, V., Righini, G., & Trubian, M. (1996). Heuristics from nature for hard combinatorial optimization problems. *International Transactions in Operational Research*, 1, pp. 1-21.
- Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2003). A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem. *Transportation Sciences*, 34, pp. 107-121.
- Daduna, J., & Paixão, J. (1995). Vehicle Scheduling for public mass transit, an overview. *Computer-aided transit scheduling*.
- Dallery, Y. (2004). Les méthodes de la logistique industrielle au service de la santé : Apports et Limitations. *Ingénierie de la santé*.
- Dantzig, G. B. (1954). A comment on Edie's "Traffic Delays at toll Booths". *Journal of the Operations Research Society of America*, 2(3), pp. 339-341.
- de Magalhães, J. M., & de Sousa, J. P. (2006). Dynamic VRP in pharmaceutical distribution - a case study. *Central European Journal of Operations Research*, 14(2), pp. 177-192.
- Dellaert, N., & Van de Poel, E. (1996). Global inventory control in an academic hospital. *International Journal of Production Economics*, pp. 227-284.
- Desrosiers, J., Laporte, G., Sauve, M., Soumis, F., & Taillefer, S. (1988). Vehicle Routing with Full Loads. *Computers & Operations Research*, 15(3), pp. 219-226.
- Di Gaspero, L., Gärtner, J., Musliu, N., Schaerf, A., Schafhauser, W., & Slany, W. (2010). A Hybrid LS-CP Solver for the Shifts and Breaks Design Problem. *Proceedings of the 7th international conference on hybrid metaheuristics*, (pp. 46-61). Vienne, Autriche.
- Di Martinelly, C. (2008). *Proposition of a framework to reengineer and evaluate the hospital supply chain*. Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain.
- Doerner, K., Hartl, R., & Reimann, M. (2000). *Ant Colony Optimization applied to the Pickup and Delivery Problem*. Working paper Series, Université de Technologie Vienne.
- Doerner, K., Hartl, R., & Reimann, M. (2001). A hybrid ACO algorithm for the full truckload Transportation. *Institute of Management, University of Vienna*, pp. 1-11.
- Doheny, J., & Fraser, J. (1996). MOBEDIC-A decision modelling tool for emergency situation. *Expert System with applications*, 10.
- Edie, L. (1954). Traffic Delays at toll Booths. *Journal of the operations research society of America*, 2(2), 107-138.
- El Hachemi, N., Gendreau, M., & Rousseau, L. (2011). A heuristic to solve the synchronized log-truck scheduling problem. *Computers & Operations Research*.

- Eliiyi, D., Ornek, A., & Karakütük, S. (2009). A fixed scheduling problem with fixed trips and time limitations. *Int. J. Production Economics*, 150-161.
- Elkhyari, A. (2003). *Outils d'aide à la décision pour des problèmes d'ordonnancement dynamiques*. Nantes: Thèse de doctorat.
- Epstein, R.-D. (2000). Economic analysis of linking operating room scheduling and hospital material management information systems for just-in-time inventory control. *Anesthesia & Analgesia*(91), pp. 337-343.
- Ernst, A., Jiag, H., Krishnamoorthy, M., & Sier, D. (2004). Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. *European Journal of Operational Research*, 153, pp. 3-27.
- Fenies, P. (2006). *Une méthodologie de modélisation par processus multiples et incrémentiels : application pour l'évaluation des performances de la Supply Chain*. Thèse de doctorat, Clermont-Ferrand.
- Fenies, P., Gourgand, M., & Tchernev, N. (2004). Une contribution à la mesure de la performance de la Supply chain hospitalière : l'exemple du processus opératoire. *Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers*.
- Florez, D. C., Aguirre, S., Amaya, S., & Velasco, N. (2008). Optimization of the laundry service in a public hospital in Bogota d. c., Colombia: A case of vehicle routing with split delivery. *Systems and Information Engineering Design Symposium. SIEDS*, 25, pp. 106-111.
- Gärtner, J., Musliu, N., & Slany, W. (2005). A Heuristic Based System for Generation of Shifts with Breaks. *Applications and innovations in intelligent system*, pp. 95-106.
- Gascon, V., & Michelon, P. (1997). Scheduling the carriers of a hospital information system: update 1998. *International Journal of Medical Informatics*, 54(3), pp. 57-67.
- Gingras, C., Cordeau, J., & Laporte, G. (2007). Un algorithme de minimisation du transport à vide appliqué à l'industrie forestière. *INFOR*, 45(1), pp. 41-47.
- Goldberg, D. (1989). *Genetic Algorithms in Search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley Professional.
- Grangeon, N. (2001). *Métaheuristiques et Modèle d'Evaluation pour le Problème du Flow-Shop Hybride Hiérarchisé: Contexte Déterministe et Contexte Stochastique*. Clermont-Ferrand: Université Blaise Pascal.
- Gronalt, M., Hartl, R., & Reimann, M. (2003). New savings based algorithms for time constrained pickup and delivery of full truckloads. *European Journal of Operational Research*, 151, pp. 520-535.
- Guinet, A., & Chaabane, S. (2003). Operating theatre planning. *International Journal of Production Economics*, 85, 69-81.
- Haj, R., Ramdane-Chérif, M., Bloch, C., & Chatonnay, P. (2008). Classification de problèmes de tournées de véhicules. *7ème Conférence Internationale de MODélisation et SIMulation - MOSIM 08*.

- Hassan, T. (2002). *Logistique hospitalière : organisation de la logistique pharmaceutique aval et optimisation des flux de consommables et de matériels à usage unique*. Thèse de Doctorat.
- Hassan, T., Baboli, A., Guinet, A., Leboucher, G., & Brandon, M. (2005). Etude des méthodes de réorganisation et de gestion de stock des services de soins d'un établissement hospitalier. *Congrès international de gestion industrielle*.
- Houssley, C. (1978). *Hospital Materiel Management*. Aspen Systems Corporation. Rockville.
- Huet, J., Chopineau, J., Pinon, V., Grémeau, I., & Gourgand, M. (2010). Proposition d'un outil d'aide à la décision pour l'organisation du circuit du médicament. *Conférence Francophone Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers*. Clermont-Ferrand.
- Huet, J.-C. (2011). *Proposition d'une méthodologie de réingénierie pour le contrôle par le produit de systèmes manufacturiers : application au circuit du médicament de l'hôpital*. Thèse de doctorat, Clermont-Ferrand.
- Jobin, M., Beaulieu, M., & Boivin, A. (2004). Gérer la performance hospitalière. *Logistique et Management*.
- Jorgensen, R., Larsen, J., & Bergovinsdottir, K. (2007). Solving the Dial-A-Ride Problem using generic algorithm. *Journal of the operational research society*, 58, pp. 1231-1331.
- Joseph, A. (2003). *Systèmes interactifs d'Aide à l'élaboration de plannings de travail de personnel*. Thèse de doctorat, Grenoble.
- Kergosien, Y. (2010). *Algorithmes de tournées de véhicules pour l'optimisation des flux de produits et patients dans un complexe hospitalier*. Thèse de doctorat, Tours.
- Kiesmüller, G. (2009). A multi-item periodic replenishment policy with full truckloads. *International Journal of production Economics*, 118(1), pp. 275-281.
- Kovacs, G. (1984). Going Full Circle With Supply Replenishment Systems. *Hospital Purchasing News*, 8, pp. 24-32.
- Kowaleski, J. (1980). Supply Distribution Options - A next perspective. *Hospital Material Management Quarterly*, 2(2), pp. 81-97.
- Landrieu, A. (2001). *Logistique inverse et collecte des produits en fin de vie, tournées de véhicules avec contraintes*. Thèse de doctorat, Grenoble.
- Landry, S., & Beaulieu, M. (2000). *Etude internationale des meilleures pratiques en logistique hospitalière*. cahier de recherche, Groupe de recherche CHAINE, Montréal.
- Landry, S., & Beaulieu, M. (2002). Logistique hospitalière : un remède aux maux du secteur de santé? *Gestion*, 26(4), 34-41.
- Landry, S., Blouin, J.-P., & Beaulieu, M. (2004). Réapprovisionnement des unités de soins : Protrait de six hôpitaux québécois et français. *Logistique & Management*, pp. 13-20.
- Landry, S., Diaz, A., & Estampe, D. (2001). Evaluation des coûts logistiques hospitaliers en France et aux Pays-Bas. *Logistique & Management*, 9(1), pp. 81-87.

- Lanzola, G., Gatti, L., Falasconi, S., & Stefanelli, M. (1999). A framework for building cooperative software agents in medical application. *Artificial Intelligence in medicine*.
- Lapierre, S., & Ruiz, A. (2004). L'approche chaîne d'approvisionnement pour organiser un service d'approvisionnement hospitalier. *Logistique & Management*, 5-12.
- Lee, C.-Y., & Qi, X. (2009). Vehicle scheduling with combinable delivery and pickup operations. *Operations Research Letters*(37), 399-404.
- Liu, R., Jiang, Z., Fung, R. Y., Chan, F., & Liu, X. (2010). Two-phase heuristic algorithms for full truckloads multi-depot capacitated vehicle routing problem in carrier collaboration. *Computers & Operations Research*(37), pp. 950-959.
- Lorino, P. (1995). *Comptes et récits de la performances, Essai sur le pilotage de l'entreprise*. Paris: Les éditions d'organisation.
- Lourenço, H., Martin, O., & Stützle, T. (2003). Iterated Local Search. *International Series in Operations Research & Management Science*, 57, 320-353.
- Melachrinoudis, E., Ilhan, A., & Min, H. (2000). A Dial-A-Ride Problem for client transportation in a health care organization. *Computers & Industrial Engineering*, 34, pp. 107-121.
- Mendoza, C., Delmond, M., Giraud, F., & Lönning, H. (2002). Tableau de bord et balanced scorecards. *Groupe Revue Fiduciaire*.
- Musliu, N., Schaerf, A., & Slany, W. (2004). Local search for shift design. *European Journal of Operational Research*(153), pp. 51-64.
- Nanry, W., & Barnes, J. (2000). Solving the pickup and delivery problem with the time windows using the reactive tabu search. *Transportation Sciences*, 34, pp. 107-121.
- Nicholson, L., Vakharia, A., & Erenguc, S. S. (2004). Outsourcing inventory management decisions in healthcare: Models and applications. *European Journal of Operational Research*(154), pp. 271-290.
- Norre, S. (2005). *Heuristiques et Métaheuristiques pour la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire dans les systèmes de production*. Habilitation à diriger des recherches.
- Parker, R., Deane, R., & Holmes, R. (1977). On the use of Vehicle Routing Algorithm for the Parallel Processor Problem with Sequence Dependent Changeover Costs. *AIIE Transactions*, pp. 155-160.
- Parragh, S. (2009). *Ambulance Routing Problems with Rich Constraints and Multiple Objectives*. Université de Vienne.
- Parragh, S., Doerner, K., & Hartl, R. (2009). Variable Neighborhood Search for the Dial-a-Ride Problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 14, 157-174.
- Pereira, F., Tavares, J., Machado, P., & Costa, E. (2002). New genetic representation for the vehicle routing problem. *Artificial Intelligence and Cognitive Science, 13th Irish Conference, AICS 2002*, (pp. 95-102). Limerick, Ireland.

- Perrin, R. (1994). Exchange Cart and Par Level Supply Distribution Systems: Form Follows Function. *Hospital Material Management*, 15(3), pp. 63-76.
- Prashant, N. (1991). A systematic approach to optimization of inventory management functions. *Hospital Material Management*(12), pp. 34-38.
- Prax, J. (2000). *Le guide du Knowledge management, Concepts et pratiques de la gestion des connaissances*. Dunod.
- Rekiek, B., Delchambre, A., & Saleh, H. (2006). Handicapped person transportation : an application of grouping genetic algorithm. *Engineering Applications of Artificial intelligence*, 19, pp. 511-520.
- Rivard-Royer, H., Landry, S., & Beaulieu, M. (2001). *Stockless hybride - une étude de cas*. Ecole des Hautes Etudes Commerciales.
- Rodier, S. (2006). *Modèles et outils pour la planification des et le pilotage des blocs opératoires : état de l'art et modèle générique de connaissance*. Mémoire de Master 2ème année en spécialité Management et ingénierie Logistique, Clermont-Ferrand.
- Rodier, S. (2010). *Une tentative d'unification et de résolution des problèmes de modélisation et d'optimisation dans les systèmes hospitaliers. Application au Nouvel Hôpital Estaing*. Thèse de doctorat, Clermont-Ferrand.
- Rossetti, M., & Selandri, F. (2001). Multi_objective analysis of hospital delivery systems. *Computers and Industrial engineering*, 41(3), pp. 309-333.
- Rossi-Turck, D., Wrincq, J., Danhier, A. M., & Menne, A. (2004). L'approvisionnement du disponible au bloc opératoire : couplage d'un méthode MRP2 et d'une livraison en kits. *Logistique & Management*(Spécial), pp. 65-77.
- Roth, A., & Van Dierdonck, R. (1995). Hospital Resources planning: concepts, feasibility and framework. *Production and Operations Management*(4), pp. 2-29.
- Salvesberg, M., & Sol, M. (1995). The general Pickup and Delivery Problem. *Transportation Sciences*, 29, pp. 17-29.
- Shang, J. S., & Cuff, C. K. (1996). Multicriteria pickup and delivery problem with transfer opportunity. *Computers and Industrial Engineering*, 30(4), pp. 631-645.
- Sheng, H.-M., Wang, J.-C., Huang, H.-H., & Yen, D. C. (2006). Fuzzy Measure on vehicle routing problem of hospitals materials. *Expert Systems with Applications*, 30, pp. 367-377.
- Shih, L.-H., & Chang, H.-C. (2001). A routing and scheduling system for infectious waste collection. *Environmental Modeling and Assessment*, 6, pp. 261-269.
- Skitt, R., & Levary, R. (1985). Vehicle routing via column generation. *European Journal of Operational Research*, 21, pp. 65-76.
- Swinehart, K., Zimmerer, T. W., & Oswald, S. (1995). Adapting a strategic management model to hospital operating strategies: A model development justification. *Journal of Management in Medicine*, 9(2), pp. 34-47.

- Syi, S., & Shih, C. (2003). Resource reallocation in an emergency medical service system using computer simulation. *Journal of purchasing and Supply Chain management*, 20.
- Taillard, E., Badeau, P., Gendreau, M., Guertin, F., & Potin, J.-Y. (1997). A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows. *Transportation Sciences*, 31, pp. 170-186.
- Thompson, G. (1995). Improved implicit optimal modeling of labor shift scheduling problem. *Management Science*, 595-607.
- Toth, P., & Vigo, D. (1997). Heuristics algorithms for the handicapped persons transportation problem. *Transportation Sciences*, 31, pp. 60-71.
- Trilling, L. (2006). *Aide à la décision pour le dimensionnement et le pilotage de ressources humaines en milieu hospitalier*. Thèse de doctorat, Lyon.
- Trilling, L., Guinet, A., & Le Magny, D. (2005). Planification de ressources mutualisées : cas des infirmiers anesthésistes. *Conférence JDMACS-JNMACS 2005*. Lyon.
- Uchimara, K., Saiho, T., & Takahashi, H. (1999). The Dial-a-Ride problem in a public transit system. *Electronics and communications in Japan*, 82, pp. 30-38.
- Van Donk, P. (20003). REdesigning the supply of glasses in a hospital. *Journal of purchasing and Supply chain management*, 9.
- Van Merode, G. G., Groothuis, S., & Hasman, A. (2004). Enterprise Resource Planning for hospital. *International Journal of Medical Informatics*(73), pp. 493-501.
- Varone, S. (2009). *Planification de personnel utilisant des techniques de flot*. Cahier de recherche, Haute école de gestion de Genève, Genève.
- Venkateshan, P., & Mathur, K. (2011). An efficient column-generation-based algorithm for solving a pickup-and-delivery problem. *Computers & Operations Research*.
- Voyer, P. (1999). Tableaux de bord de gestion et indicateurs de performance. *Presse de l'Université du québec*, 61.

Annexes

1. Modèle de simulation Java – calcul des dates

Une fois le remplissage effectué, le contenant doit être chargé dans un véhicule. Nous allons donc présenter l'algorithme pour l'étape suivante.

1. Identifier et réserver le quai de chargement
2. **Si** le contenant, le véhicule, le chauffeur et le quai sont disponibles **alors**
3. Identifier et réserver le quai
4. Date de fin de l'étape = Date de début de l'étape + Durée
5. Date de début au plus tôt de l'étape suivante = Date de fin de l'étape
6. Mettre à jour la réservation des ressources
7. Libérer le quai de chargement
8. Sinon
9. Mettre en attente le contenant, le véhicule et le chauffeur
10. Incrémenter la date de début au plus tôt de l'étape
11. Fin si

Figure 92 : Algorithme de l'étape 2 (chargement)

Une fois le contenant chargé dans le véhicule, l'étape qui suit consiste à transporter le contenant jusqu'à sa destination.

1. Mettre à jour la réservation des ressources
2. Date de fin de l'étape = Date de début de l'étape + Durée
3. Date de début au plus tôt de l'étape suivante = Date de fin de l'étape
4. Mettre en attente les ressources pour l'étape suivante

Figure 93 : Algorithme de l'étape 3 (transport)

Etant donné que le transport ne nécessite pas de ressources supplémentaires, il est réalisé sans attente après le transport. Une fois le transport effectué, le contenant est déchargé.

1. Identifier et réserver le quai de déchargement
2. **Si** le quai de déchargement est disponible **alors**
3. Date de fin de l'étape = Date de début de l'étape + Durée
4. Mettre à jour la réservation des ressources
5. Date de début au plus tôt de l'étape suivante = Date de fin de l'étape
6. **Si** l'étape suivante peut débuter immédiatement après le déchargement **alors**
7. Mettre en attente le véhicule et le chauffeur
8. Fin si
9. Libérer le quai de déchargement
10. Sinon
11. Incrémenter la date de début au plus tôt de l'étape
12. Fin si

Figure 94 : Algorithme de l'étape 4 (déchargement)

Une fois le contenant livré au site de consommation, celui-ci sera ensuite acheminé aux lieux de consommation.

1. **Si** le contenant est déchargé **alors**
2. Date de fin de l'étape = Date de début de l'étape + Durée
3. Mettre à jour la réservation des ressources
4. Sinon
5. Incrémenter la date de début au plus tôt de l'étape
6. Fin si

Figure 95 : Algorithme de l'étape 5 (consommation)

En fonction du type de produit livré, le contenant reste soit quelques heures pour être récupéré ensuite, soit jusqu'au lendemain. Dans le cas où le contenant est récupéré le lendemain, celui-ci est réservé jusqu'à la fin de l'horizon de simulation. Dans le cas où le contenant est récupéré après une activité de distribution de contenant propre ou non, l'algorithme est le suivant.

1. Date de fin de l'étape = Date de début de l'étape + Durée
2. Mettre à jour la réservation du contenant
3. **Si** le chauffeur et le contenant sont disponibles **alors**
4. Mettre en attente le chauffeur et le véhicule
5. Fin si

Figure 96 : Algorithme l'étape 6 (ramassage)

L'étape de ramassage représente la durée de ramassage des contenants dans les lieux de consommation jusqu'au quai de chargement. Nous retrouvons ensuite les étapes de chargement, de transport et de déchargement qui correspondent aux étapes 2, 3 et 4. Une fois le contenant sale déchargé sur le quai du site de production, il faut ensuite procéder au nettoyage avant réutilisation.

1. **Si** la date courante est comprise dans les dates d'ouverture et de fermeture du planning des aires de nettoyage **alors**
2. Date de fin de l'étape = Date de début de l'étape + Durée
3. Sinon
4. Mettre en attente le contenant
5. Incrémenter la date de début au plus tôt de l'étape
6. Fin si

Figure 97 : Algorithme de l'étape 10 (nettoyage)

Une fois les activités de transport réalisées, il s'agit alors d'organiser les transports à vide reliant les activités. Nous allons commencer par le transport depuis le dépôt.

1. **Si le véhicule est disponible alors**
2. **Si le chauffeur est disponible alors**
3. Date de fin de l'étape = Date de début de l'étape + Durée
4. Mettre à jour la réservation du véhicule et du chauffeur
5. **Si le contenant est disponible alors**
6. Mettre en attente le contenant
7. Fin si
8. Sinon
9. Incrémenter la date de début au plus tôt de l'étape
10. Fin si
11. Sinon
12. Incrémenter la date de début au plus tôt de l'étape
13. Fin si

Figure 98 : Algorithme de l'étape 11 (transport à vide depuis le dépôt)

Cette étape permet de réaliser un transport entre le dépôt et l'origine de la première activité. Le transport à vide entre deux sites est présenté dans l'étape suivante.

1. Date de fin de l'étape = Date de début de l'étape + Durée
2. Mettre à jour la réservation du chauffeur et du véhicule
3. **Si le contenant est prêt alors**
4. Mettre en attente le contenant
5. Fin si

Figure 99 : Algorithme de l'étape 12 (transport entre deux sites)

La dernière étape consiste à organiser le transport à vide entre la destination de la dernière activité et le dépôt.

1. Date de fin de l'étape = Date de début de l'étape + Durée
2. Mettre à jour la réservation des ressources
3. **Si le chauffeur a une autre activité à réaliser alors**
4. Mettre en attente le chauffeur
5. Fin si

Figure 100 : Algorithme de l'étape 13 (transport à vide au dépôt)

Grâce à ces algorithmes, nous pouvons simuler une solution et déterminer pour chaque étape les dates effectives de début et de fin, les ressources utilisées.