



HAL
open science

Approche générique pour la prise de décisions multi-niveaux, contribution à la gestion des systèmes de production de soins en réseau

Linjie Chen

► **To cite this version:**

Linjie Chen. Approche générique pour la prise de décisions multi-niveaux, contribution à la gestion des systèmes de production de soins en réseau. Optimisation et contrôle [math.OC]. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2015. Français. NNT : 2015STET4006 . tel-01271530v2

HAL Id: tel-01271530

<https://theses.hal.science/tel-01271530v2>

Submitted on 14 Jan 2017

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 Jean Monnet – Saint Etienne

THESE

En vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR EN GENIE INDUSTRIEL

*Préparée au Laboratoire d'Analyse des Signaux et des Processus Industriels
(LASPI)*

Dans le cadre de l'Ecole Doctorale Sciences Ingénierie et Santé (ED SIS)

APPROCHE GÉNÉRIQUE POUR LA PRISE DE DÉCISIONS MULTI-
NIVEAUX, CONTRIBUTION À LA GESTION DES SYSTÈMES DE
PRODUCTION DE SOINS EN RÉSEAU

Présentée et soutenue publiquement par

CHEN Linjie

Le 3 Juillet 2015

JURY

Mme. Nathalie SAUER	PU, Université de Lorraine	Rapporteur
M. Yves SALLEZ	PU, Université de Valenciennes	Rapporteur
M. Alain FERRARINI	MCF, Université de Marseille	Examinateur
Mme. Sylvie NORRE	PU, IUT de Montluçon	Examinateur
M. Eric MARCON	PU, Université de Saint-Etienne	Examinateur
M. WANG Tao	MCF, Université de Saint-Etienne	Co-directeur de thèse
M. Thibaud MONTEIRO	PU, INSA Lyon	Directeur de thèse

Remerciement

Je suis très reconnaissant à mes directeurs de thèse, Professeur Thibaud MONTEIRO, et M. WANG Tao, pour la confiance, la patience, et l'encouragement dont ils m'ont entouré durant ma thèse. Je les remercie vivement, pour leurs disponibilités, leurs guides pertinents scientifiques et méthodologiques, ainsi que toutes les aides qu'ils ont proposées en dehors du travail de recherche.

Je remercie sincèrement Professeur Eric MARCON pour ses conseils constructifs, pour son encouragement, et pour le partage de ses expériences et de temps précieux, depuis mes études en master jusqu'à présent.

Je tiens à remercier la plateforme CIROH dans laquelle ma thèse s'est démarrée, ainsi que les collègues, Mlle. Yolande BERTRAND, M. Thibaut DEVILLE et M. Florian CHAMPALLE, qui ont partagés leurs compétences dans des domaines divers, pour leurs contributions au projet qui m'ont apporté des visions complémentaires à mon sujet de thèse.

J'aimerais aussi remercier mon laboratoire d'accueil (LASPI), directeur du laboratoire Professeur François GUILLET, et mes collègues de travail pour leurs soutiens et amitiés.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance aux membres du jury, Professeur Nathalie SAUER et Professeur Yves SALLEZ, mes rapporteurs, pour avoir pris le temps de lire et corriger ce mémoire dans les moindres détails et juger ce travail, Professeur Sylvie NORRE, président du jury, M. Alain FERRARINI et Professeur Eric MARCON, mes examinateurs, pour leur confiance, leur présence, leur sympathie et conseil qui m'ont permis de finaliser ce travail de thèse,

Un grand merci enfin à toute ma famille et mes amies, en particulier à mon père M. CHEN Hongming, ma mère Mme. LIN Yanqin et ma femme Mme. LUO Man, pour m'avoir supporté infiniment et de rester fier de moi.

CHEN Linjie

Table des matières

Introduction.....	7
Chapitre I :	11
I-1. Situation du système de santé français	11
I-1.1. Les établissements de santé	12
I-1.2. Dépenses de santé en France	13
I-1.3. Modes de financement des établissements de santé	14
I-2. Pourquoi le Génie Hospitalier ?	16
I-2.1. Déficit depuis des années	16
I-2.2. Ressources dans le système de santé	18
I-2.3. Les principaux enjeux du Génie Hospitalier	20
I-3. Bref état de l'art sur l'évolution des travaux en Génie Hospitalier	21
I-3.1. Évolution du périmètre des travaux en Génie Hospitalier.....	21
I-3.1.1. Travaux de recherche de petit périmètre	22
I-3.1.2. Travaux de recherche de moyen périmètre	22
I-3.1.3. Travaux de recherche de grand périmètre	23
I-3.2. Différents structures de pilotage.....	25
I-3.2.1. Structure <i>1</i> -site, l'agencement centralisé et l'agencement hiérarchique au sens strict.....	27
I-3.2.2. Structure <i>n</i> -sites, l'agencement hétérarchique au sens strict.....	29
I-3.2.3. Réseau, l'agencement hétérarchique / hiérarchique au sens large 31	
I-3.2.3.1. Réseau de soins des urgences	32
I-3.2.3.2. Réseau de soins des services médico-sociaux	33
I-3.3. Génie Hospitalier au niveau international	34
I-4. Conclusion	35
Chapitre II :	36
II-1. Introduction	36
II-2. Description du projet	36
II-2.1. Contexte et enjeux	36
II-2.2. Dispensation à Délivrance Individuelle et Nominative (DDIN)	38
II-2.3. Objectifs du projet	40

II-3. Approche de résolution	44
II-3.1. Approche simplifiée	44
II-3.1.1. Localisation du centre	46
II-3.1.2. Tournées de véhicules	47
II-3.2. Approche intégrée	50
II-3.2.1. Méthode exacte	50
II-3.2.2. Méthode approchée	54
II-3.2.2.1. Optimisation par essais particuliers (PSO)	54
II-3.2.2.2. Approche de résolutions en l'optimisation par essais particulaires	57
II-4. Conclusion	59
Chapitre III :	61
III-1. Différents niveaux décisionnels	61
III-1.1. Niveau stratégique	62
III-1.1.1. Le problème de localisation	62
III-1.1.2. Le problème de dimensionnement	63
III-1.1.3. Le problème du choix technologique	64
III-1.2. Niveau tactique	64
III-1.3. Niveau opérationnel	65
III-2. Articulation entre différents niveaux décisionnels	68
III-2.1. Modélisation intégrée	69
III-2.2. Modélisation parallèle	71
III-2.3. Modélisation hiérarchisée	71
III-3. Résolution du problème d'optimisation multi-niveau	74
III-3.1. Sous-structure optimale directe / feedback	75
III-3.2. Sous-problème homogène / hétérogène	79
III-3.2.1. Sous-problème homogène, le problème d'ordonnancement Flow-Shop hybride	80
III-3.2.1.1. Problème d'ordonnancement de flow shop hybride	80
III-3.2.1.2. Autre cas de sous-problèmes homogènes	82
III-3.2.2. Sous-problème hétérogène	82
III-3.2.1.3. Problème de localisation-routage	83
III-3.2.1.4. Problèmes multi-niveaux dans le secteur de la santé	84
III-3.2.1.5. Autre cas de sous-problèmes hétérogènes	85

III-4. Conclusion	85
Chapitre IV :	87
IV-1. Introduction	87
IV-2. Le choix de la méta-heuristique primitive	87
IV-3. Nouvelle variante d'une PSO dans un cadre multi-niveaux (MLPSO original)⁸⁹	
IV-4. Modules d'amélioration de la performance de la MLPSO	96
IV-4.1. Critère d'arrêt dynamique de sous essaim	98
IV-4.2. Accélérateur de convergence	100
IV-4.3. Mémoire inter-niveau permanente	102
IV-5. Historique du développement	104
IV-5.1. Phase 1	104
IV-5.2. Phase 2	107
IV-5.3. Phase 3	109
IV-6. Conclusion	110
Chapitre V :	112
V-1. Applications du MLPSO	112
V-1.1. HFSMT	112
V-1.1.1. Implémentation	113
V-1.1.2. Analyse des résultats	114
V-1.2. CLRP	117
V-1.2.1. Implémentation	118
V-1.2.1.1. Niveau 1 – la projection de l'espace de recherche	118
V-1.2.1.2. Niveau 2 –la projection de l'espace de recherche	119
V-1.2.1.3. Niveau 3 –la projection de l'espace de recherche	120
V-1.2.2. Analyse des résultats	121
V-2. Analyses du MLPSO	126
V-2.1. PSO (mono-niveau) vs. PSO (multi-niveaux)	127
V-2.2. Analyse de la robustesse du paramétrage	129
Conclusion et perspectives.....	132
Références.....	136
Liste de publications (2012 – 2014)	148
Liste des figures	149
Liste des tableaux.....	151

Résumé.....	152
Annexes	154

Introduction

De nos jours, l'aide à la décision basée sur l'optimisation joue un rôle majeur dans tous les secteurs de la production de biens et de services, qu'ils soient industriels, hospitaliers ou commerciaux. Quel que soit le domaine d'activité et la nature des problèmes, les méthodes d'optimisation peuvent contribuer à fournir des solutions qui éclairent à la prise de décision. Pourtant l'optimisation d'un système local implique non seulement la maîtrise de contraintes locales mais aussi une réflexion collective de l'ensemble des décideurs en prenant en compte l'ensemble du processus. Une vision globale est nécessaire pour parvenir à une réelle performance et à l'établissement de synergies entre des systèmes dissociés au niveau organisationnel. Cela est vrai autant pour une coordination des activités entre différents établissements, que pour une coordination de services au sein d'un seul établissement. Cette approche globale est particulièrement requise aujourd'hui où l'environnement évolue vite. Par conséquent, même si l'optimisation des différents types de problèmes isolés a été largement étudiée par les ingénieurs industriels et les chercheurs, l'un des défis actuels réside dans la résolution conjointe de problèmes qui sont traités aujourd'hui de façon disjointe et sous-optimale. À cette fin, le défi à relever est celui de la définition et du développement d'une approche d'optimisation efficace qui soit apte à prendre en compte l'interdépendance décisionnelle. Le challenge est aussi de rendre cette approche la plus générique possible pour une grande variété de combinaison de problèmes tout en maintenant la performance de résolution dans la complexité.

Le point de départ de ce travail de thèse a été celui du pilotage des réseaux de santé, pour accompagner un projet de conception d'un réseau de mutualisation de ressources de production sur un ensemble d'établissements. Le projet, réalisé dans le cadre du CIROH¹ et en partenariat avec la Mutualité de la Loire, concerne à mettre en place d'un système de dispensation des médicaments à délivrance nominative et individuelle pour un réseau constitué d'un ensemble d'établissements de santé géographiquement dispersés. La problématique concernait à la fois la conception du réseau et son organisation logistique. Il s'agissait donc d'un problème d'optimisation combinant deux niveaux décisionnels : stratégique et opérationnel.

¹ CIROH : Centre Interrégional de l'Organisation Hospitalière

Le contexte spécifique de la résolution de ce problème nous a conduit à nous intéresser à la généralisation d'une démarche de résolution des problèmes de décision imbriqués dans une structure multi-niveaux et à l'extension de cette approche vers des problèmes de tailles plus importantes. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à des problèmes d'optimisation multi-niveaux considéré comme un NP-difficile ou NP-difficile au sens fort. Cela est vrai si au moins un des sous-problèmes imbriqué est NP-difficile. Dans ce cas, les méthodes exactes ou des recherches exhaustives ne sont que rarement efficaces. La plupart des travaux de recherche traitant ce type de problème utilisent soit une heuristique ad-hoc, soit une méthode hybride basée sur des algorithmes méta-heuristiques et des heuristiques. Par définition, ces approches sont généralement applicables qu'à un type de problème spécifique.

Pour contribuer à une meilleure gestion des problèmes de décision multi-niveaux et s'affranchir du développement d'heuristiques dédiées spécifiquement à un type de problèmes, nous cherchons, à travers cette thèse, à proposer une approche générique de résolution du problème d'optimisation multi-niveau. Le but est de garantir une cohérence des décisions distribuées sur différents niveaux décisionnels et d'assurer une vision globale de la performance. Une procédure récursive a été conçue pour générer en continu des espaces de recherche dans un diagramme d'arborescence. L'optimisation par essaim de particules a été choisie pour optimiser les sous-problèmes à chaque niveau. La contribution de cette approche consiste à développer un mécanisme d'échange d'informations et de paramètres entre les niveaux. Ce mécanisme assure la cohérence de la convergence inter-essaims.

La présentation de ces travaux de cette thèse est structurée selon les cinq parties suivantes :

Le chapitre 1 explique comment les réseaux de soins peuvent contribuer à l'efficacité et à la réduction des coûts du système de santé. La recherche de cette efficacité et de synergies a notamment conduit à proposer un nouveau mode de prise en charge des activités de santé basé sur la mutualisation des ressources et des compétences. Nous présentons dans ce chapitre le système de santé français, l'organisation des soins et les différentes structures de pilotage, ainsi qu'un état de l'art sur les travaux existants dans le domaine du génie hospitalier.

Le chapitre 2 présente le projet de conception d'un réseau de mutualisation des ressources médicales dans le département de la Loire. Nous y décrivons le contexte du projet, la démarche d'analyse, ainsi que la formulation du problème. Le problème de prise de décision multi-niveaux est modélisé et résolu, d'abord en utilisant la programmation linéaire à nombre entier (PLNE), et ensuite, à l'aide d'un algorithme méta-heuristique (PSO). Compte tenu de l'extension possible du réseau et l'universalité de cette classe de problème, nous exposons une généralisation de cette la résolution vers des problèmes d'optimisation multi-niveaux.

Le chapitre 3 offre une vue générale sur les questions scientifiques relatives à la modélisation et la résolution des problèmes d'optimisation multi-niveaux. Une classification de ces problèmes est proposée en fonction de différentes démarches de résolution et constitutions des sous-ensembles. Nous définissons également dans cette partie notre positionnement scientifique et l'approche de résolution envisagée pour la classe des problèmes d'optimisation multi-niveaux.

Le chapitre 4 présente notre approche d'optimisation par essaim de particules multi-niveaux (MLPSO). En plus de l'algorithme général de résolution, nous proposons trois modules d'amélioration du temps de calcul. La démarche informatique de développement du MLPSO et des trois modules est également présentée dans ce chapitre.

Dans le chapitre 5, nous appliquons notre démarche à deux « classiques » des problèmes de décision, que nous structurons selon une approche multi-niveaux, le problème du LRP et le problème du Flow-Shop Hybride (HFS). Pour cela, nous détaillons les deux applications de résolution en intégrant aussi le problème issu du projet de conception de réseau de mutualisation des ressources médicales. Nous comparons les résultats avec les travaux scientifiques existants. Cette analyse comparative permet de confirmer la performance de l'approche MLPSO par rapport aux approches heuristiques ad hoc, mais aussi par rapport au PSO mono-niveau.

En conclusion, cette thèse apporte une contribution à la généralisation de la résolution d'une classe (e.g. sous-structure optimale feedback) de problème

d'optimisation multi-niveaux et au développement des outils d'aide à la décision associés.

Chapitre I :

Présentation contextuelle du Génie Hospitalier

I-1. Situation du système de santé français

Le système de santé, est l'organisation des personnes, des établissements et des ressources qui offrent des services de soins pour répondre aux besoins en santé des populations. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (World Health Organization), les objectifs de ce système sont le maintien de la bonne santé des citoyens, la réponse aux attentes de la population, avec des moyens de financement équitables. Pour tendre vers ces objectifs, les systèmes effectuent quatre fonctions vitales : la fourniture de services de soins de santé, la génération de ressources, le financement et l'intendance (World Health Organization, 2000). Classiquement, l'évaluation des systèmes de santé est effectuée selon les dimensions suivantes : la qualité, l'efficacité, l'acceptabilité et l'équité (Duckett, 2004). En outre, la continuité des soins de santé est aussi un objectif majeur.

Il existe une grande variété de systèmes de santé à travers le monde, avec autant d'histoires et de structures organisationnelles que de nations. Dans certains pays, l'organisation du système de santé est distribuée parmi les acteurs du secteur. Dans d'autres, il s'agit d'un effort concerté entre les gouvernements, les syndicats, les organisations caritatives, les organisations religieuses, ou d'autres établissements coordonnés pour fournir des services de soins de santé ciblés pour les populations qu'ils desservent. Cependant, l'organisation des soins de santé a été souvent décrite comme évolutive plutôt que révolutionnaire (World Health Organization, 2000; Gawande, 2009).

Par conséquent, la comparaison directe entre ces différents systèmes de santé est souvent complexe. Le rapport de l'Organisation Mondiale de la Santé en 2000 (World Health Organization, 2000) a publié les indicateurs sur la base des statistiques comparatives pour différents pays. Selon ce rapport, le système de santé français a été classé comme premier. Les indicateurs de satisfaction et l'état de santé globale confirment le point de vue que, même si le système de santé français n'est pas le meilleur en fonction de tous ces critères, celui-ci est impressionnant et mérite une attention pour quiconque s'intéresse à la réforme des soins de santé. Surtout pour le pays comme États-Unis, bien que système de santé

des États-Unis possède l'investissement le plus important, ses résultats sont toujours moins performants par rapport aux autres pays développés, une différence majeure est que les États-Unis est resté longtemps un pays sans soins de santé universels, jusqu'à la réforme du Obamacare en 2010. Les politiques français ont défendu leur système de santé comme une synthèse idéale de la solidarité et du libéralisme. Le système de santé en France doit trouver un équilibre entre, un système nationalisé comme celui de la Grande-Bretagne, dans lequel trop de restrictions sont constatées, et un système fortement compétitif comme celui des États-Unis, où la qualité des soins n'est pas toujours présente.

I-1.1. Les établissements de santé

Au 31 décembre 2012, un total de 2 660 établissements de santé existait en France dont 931 établissements publics, 699 établissements privés à but non lucratif et 1 030 établissements privés à but lucratif (insee.fr, 2014). Ces établissements publics et privés coexistent en France pour la délivrance des soins spécialisés et techniques. Les établissements de santé offrent majoritairement des lits d'hospitalisation complète, mais également des places en hospitalisation de jour.

Les hôpitaux publics sont structurés selon le Code de la Santé Publique, on y trouve :

- les Centres Hospitaliers Régionaux (CHR) : ils ont une vocation régionale liée à leur haute spécialisation pour assurer les soins courants à la population proche. La majeure partie des CHR sont aussi des centres hospitaliers universitaires (CHU) où sont organisés les enseignements et recherches médical, pharmaceutique et postuniversitaire. Selon les données de 2012, 33 CHU sont implantés pour d'une capacité totale de 76 000 lits (DREES, 2012).
- les centres hospitaliers (CH) : au sein de chaque territoire de santé doit se trouver un hôpital général qui doit assurer toute la gamme des soins aigus en médecine, chirurgie et obstétrique (MCO), ainsi que les soins de suite et de longue durée. Certains d'entre eux ont une vocation régionale et universitaire. Au nombre de 810 en 2012, ils totalisent 154 000 lits d'hospitalisation complète sur les 260 000 du secteur public

(DREES, 2012). Parmi les centres hospitaliers, 90 sont spécialisés en psychiatrie et donc sectorisés.

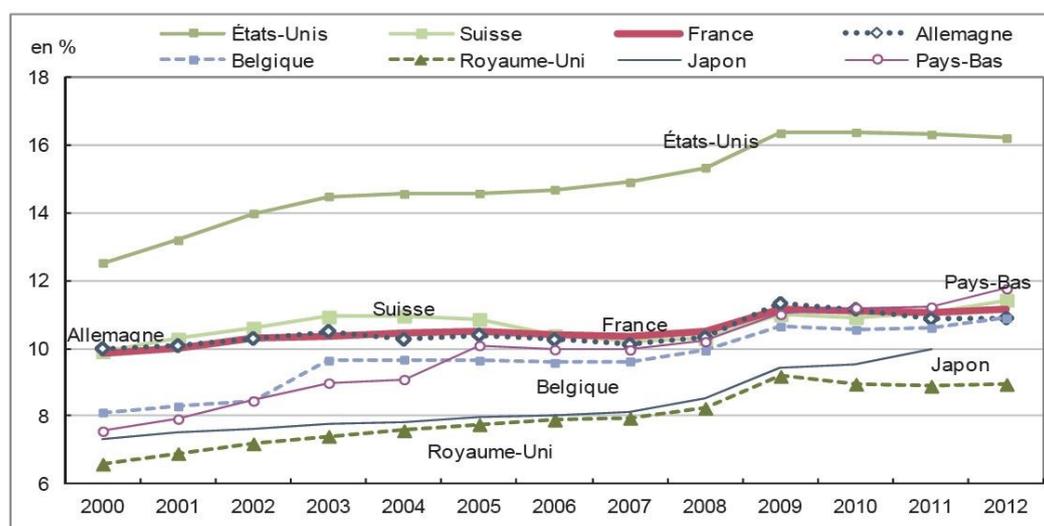
Parmi les établissements privés, on identifie :

- les hôpitaux privés participant au service public hospitalier (PSPH), qui relèvent d'associations, de congrégations, d'organismes sociaux, ils assurent une ou plusieurs missions de service public comme l'offre de soins préventifs, curatifs ou palliatifs, mais ne sont pas astreints aux mêmes règles que les hôpitaux publics.
- les établissements privés à but lucratif, qui sont la propriété de particuliers ou de sociétés autorisées à faire des bénéfices, avec 1 097 établissements de santé privés représentant 114 000 lits et places et représentent ainsi 25 % de l'offre nationale, assurent chaque année 66 % de la chirurgie ambulatoire et 54 % des opérations chirurgicales (Rapport sectoriel, 2013).

I-1.2. Dépenses de santé en France

Le système de santé français est un système universel financé en grande partie par l'assurance maladie nationale. Dans son évaluation des systèmes de santé dans le Monde, l'organisation mondiale de la santé a révélé que la France a fourni la « meilleure prestation » dans le monde ((World Health Organization, 2000). En 2013, la France a consacré 11,7 % du produit intérieur brut (PIB) en base 2010 aux soins de santé, qui s'élève à 247,7 milliards d'euro au total, 3 772 euros par habitant, soit 2,2 % d'augmentation par rapport à 2012 (DREES, 2014). Ce chiffre est beaucoup plus élevé que la moyenne des dépenses par pays en Europe (*Figure I-1*), mais moins que celle aux États-Unis (16,2 % du PIB en 2012) (DREES, 2014). Cette somme (i.e. dépense courante de santé, en abréviation DCS) représente l'ensemble des dépenses courantes (les dépenses en capital en sont exclues) dont la charge est assurée par les financeurs du système de santé : Sécurité sociale, État, collectivités locales, organismes de protection complémentaire (mutuelles, sociétés d'assurances, institutions de prévoyance) et ménages. Elle couvre un champ plus large que la consommation de soins et biens médicaux (i.e. CSBM), puisqu'elle prend également en compte : les soins aux personnes âgées et handicapées en établissement, les services de soins infirmiers à domicile (SSIAD), les indemnités journalières (IJ maladie, maternité et accidents

du travail et maladies professionnelles), les subventions reçues par le système de santé, les dépenses de prévention (individuelle ou collective), de recherche et de formation médicales ainsi que les coûts de gestion de la santé. De manière correspondante, la consommation de soins et biens médicaux comprend les soins hospitaliers, les soins de ville (médecins, dentistes, auxiliaires médicaux, laboratoires d'analyses, thermalisme), les transports de malades, les médicaments et les autres biens médicaux (optique, prothèses, petits matériels et pansements). Elle s'établit à 8,8 % du PIB en 2013, contre 8,7 % en 2012, ce qui montre une croissance des dépenses faible mais continue.



Sources : DREES, Comptes de la santé - base 2005 pour la France ; OCDE, Éco-Santé 2014 pour les autres pays - base 2005.

Figure I-1 Évolution de la dépense de santé dans le PIB des pays de l'OCDE (DREES, 2014)

I-1.3. Modes de financement des établissements de santé

Depuis 2004-2005, les deux principaux modes de financement des établissements de santé coexistant, la tarification à l'activité (T2A) et le budget forfaitaire, sont déterminés à la fois par les disciplines exercées et, accessoirement, par leur statut juridique (DREES, 2012).

Le financement par la tarification à l'activité a été introduite en 2004 dans les établissements publics et ceux participant au service public hospitalier, et en 2005 dans les établissements privés à but lucratif. La T2A rémunère l'activité de soins produite dans les disciplines de médecine, chirurgie, obstétrique et

odontologie (MCO) quels que soient le statut de l'établissement et le type d'activité (hospitalisation complète, partielle, à domicile, et structure de dialyse).

Financement par budget forfaitaire, concernant les autres disciplines (soins de suite et de réadaptation, psychiatrie et long séjour), elles sont appelées à connaître un mode de financement similaire à la T2A mais demeurent pour l'instant financées selon un mode différent, qu'il s'agisse d'établissements publics et privés participant au service public hospitalier ou d'établissements privés à but lucratif (facturation de prix de journée). L'objectif national des dépenses d'Assurance maladie (ONDAM) présente depuis 2006 deux sous-objectifs hospitaliers distincts selon le mode de financement qui génère ces dépenses : les dépenses des établissements de santé relevant de la tarification à l'activité et les autres dépenses relatives aux établissements de santé.

La mise en place de T2A dans les établissements de soins publics et privés, associée à un contexte de la pénurie des ressources humaines qualifiées (médecins, infirmiers) incitent les hôpitaux à remettre en cause leurs fonctionnements. Sans oublier que l'impact du régime des 35 heures, et l'insuffisance des créations d'emplois à l'hôpital, souvent considérés comme une cause majeure du phénomène du déficit de ressources humaines. Cette remise en cause s'opère notamment dans le secteur chirurgical par la modification des organisations des plateaux médico-techniques afin de réduire les coûts d'exploitation et d'augmenter l'efficacité des systèmes (Rapport final projet HRP2). La mutualisation des ressources humaines et matérielles ainsi réalisée assure un meilleur partage de celles-ci et rend possible des économies d'échelle. D'autre part, les transformations posent la problématique du diagnostic, de l'évaluation de la performance des organisations, et de l'objectivation de la pratique. Elle pose aussi la problématique des outils d'aide à la décision pour la gestion prévisionnelle et opérationnelle en termes de l'optimisation de l'organisation des ressources hospitalières. Dans ce contexte, la recherche d'optimalité est souvent multicritère, elle doit prendre en compte les aspects économiques par rapport à la productivité mais aussi les aspects de qualité des soins qui est en effet liée à la gestion des risques pour les patients, et aussi les personnels. Elle pose enfin la problématique d'une démarche et des outils de la conduite de cette mutation. Des outils qui permettront l'évaluation et la validation des choix stratégiques en termes de nouvelles infrastructures et d'organisations humaines et matérielles qui devront être mises en place.

I-2. Pourquoi le Génie Hospitalier ?

Au cours de la dernière décennie, le système de santé français est confronté aux défis croissants de :

- l'augmentation de la demande des services de soin,
- l'offre de soins devient de plus en plus concurrentielle,
- la complexification des techniques médicales, ce qui se complexifie aussi l'organisation de l'utilisation de certains ressources,
- la pénurie et la répartition inégale des professionnels de la santé, ce qui entraîne les inégalités dans l'accès aux soins de santé,
- la coopération inter-hospitalière devient indispensable.

Ces phénomènes montrent que le système de santé doit être capable de répondre à une hausse de la demande de services de soins avec une forte pression financière. Face à ces défis, le génie hospitalier cherche aujourd'hui à fournir des soins de meilleure qualité à tous, à maintenir la performance du système de santé en le rendant plus résistant aux problématiques liées à l'évolution démographique, économique et technologique, tout en restant financièrement viable à court, moyen et long terme.

I-2.1. Déficit depuis des années

Comme nous l'avons dit en préambule, l'organisation mondiale de la santé a classé le système de santé français parmi les plus performants (World Health Organization, 2000). Mais les déficits de plus en plus importants et récurrents de l'assurance-maladie sont sources d'inquiétude et suscitent des interrogations concernant le financement de ce système. Les dépenses recouvrent des soins, qui doivent être financés soit par des fonds publics (impôts et cotisations sociales) soit par des fonds privés (assurances, mutuelles et malades). Elles constituent aussi les revenus de l'industrie pharmaceutique et de l'ensemble des professionnels de santé. En effet, il est constaté que les financements du système de santé français n'arrivent pas à couvrir les dépenses, de 2009 à 2011, le déficit annuel de l'assurance-maladie est près de de 10 milliards d'euros, et atteint même un déficit

de 11,4 milliards d'euros en 2010 (Tronquoy, 2012). En dix ans, le déficit cumulé dépasse les 65 milliards (Tronquoy, 2012).

La croissance des dépenses de santé peut s'expliquer par une augmentation de la demande et aussi de l'offre.

Selon les données d'INSEE, les dépenses de santé en France sont passées de 4 % du PIB en 1960 à plus de 11 % en 2010, on peut imputer cette hausse, au début de la période, à la demande d'une population de mieux en mieux couverte par une assurance maladie obligatoire (30 % des personnes en 1960, 85 % en 1990), le pourcentage de la population couverte est passé en 2010 à 95 %. Le vieillissement a joué un rôle mineur mais quand même associé à une augmentation des maladies chroniques et multi-morbidité conduisant à la demande croissante des services de santé (Lepez et al., 2004). Une autre cause à prendre en compte est celui de l'amélioration du niveau d'information de la population qui engendre une demande des usagers de plus en plus exigeante.

Quant aux causes de l'augmentation de l'offre, ils sont liés aux soins ambulatoires (démographie médicale, liberté de prescription des médecins), aux soins hospitaliers (progrès des techniques médicales parfois plus onéreux), et aussi au prix des médicaments, malgré la généralisation des remboursements et des médicaments génériques.

Une telle pression financière nécessite naturellement de rationaliser les dépenses de santé sans avoir une diminution de la qualité des soins. La loi de financement de la Sécurité sociale (LFSS), qui fixe l'ONDAM (objectif national des dépenses d'assurance maladie), constitue l'instrument de régulation de ces dépenses. Les mesures de réduction des dépenses du système de santé résident dans la planification sanitaire, pour limiter l'offre, le mode de tarification à l'activité pour une meilleure approche médicalisée de l'activité et les alternatives à l'hospitalisation classique comme HAD (hospitalisation à domicile) ou la généralisation à l'hospitalisation de jour afin de réduire les coûts de prise en charge. Ces mesures demandent non seulement une répartition optimale des ressources hospitalières dans le cadre de fonctionnement actuel, mais aussi une organisation améliorée dans un nouvel environnement avec les ressources mutualisées.

I-2.2. Ressources dans le système de santé

Les ressources du système de santé sont les moyens disponibles mis au service de la population. Pour qu'un système de santé soit efficace et efficiente, il doit disposer des ressources suffisantes, et ces ressources doivent être utilisées et gérées de manière appropriée. Les ressources du système de santé peuvent être classées en quatre catégories :

Financier, plusieurs acteurs interviennent dans le financement des dépenses de santé : la Sécurité sociale, le secteur public, les mutuelles et le secteur privé. Le financement des dépenses de soins et de biens médicaux est assuré aux trois quarts par la Sécurité sociale (75,5 % en 2012). Le dernier quart est pris en charge par les organismes complémentaires d'assurance maladie à hauteur de près de 14 %, par les ménages à environ 10 %, et par l'État à 0,5 % (DREES, 2014).

Capital matériel, il est composé des infrastructures de soins de santé non-humaines, tels que les blocs opératoires, les lits, les équipements médicaux... L'investissement aux ressources matérielles représente des coûts immédiats élevés, y compris le prix d'achat, l'entretien et la maintenance, ainsi que la formation du personnel qualifié. En outre, ce type de ressource est souvent lié au niveau stratégique, soit compliqué à modifier une fois implémenté, ce qui souligne l'importance de la pré-planification et post-organisation.

Consommables, ce sont les ressources jetables utilisées régulièrement pendant la délivrance des soins, ils comprennent: la consommation de soins et biens médicaux (CSBM) et la consommation de services de médecine préventive, qui s'élèvent à 183,6 milliards d'euros en 2012 (DREES, 2014). Les consommables (en particulier les médicaments) constituent une part importante des dépenses dans le fonctionnement quotidien du système de santé.

Ressources humaines, ce sont les personnes intervenant dans la santé publique et individuelle. La pénurie des professionnels de santé devient aujourd'hui une problématique importante, marquée surtout par le manque de médecins et d'infirmiers.

Ces ressources doivent être gérées de façon appropriée afin d'optimiser la performance du système de santé. L'optimisation de l'utilisation d'une ressource ne peut pas être appréhendée que localement, le plus souvent, cette optimisation

met en jeu l'interdépendance des ressources. Classiquement, l'optimisation d'un problème donné consiste à fournir la ou les solution(s) améliorant un ou plusieurs objectifs quantitatifs tout en respectant un éventuel jeu de contraintes. Dans le génie hospitalier, les ressources du système de santé peuvent être optimisées par :

- La phase stratégique, il s'agit de proposer les solutions de conception pour un système local. Par exemple le dimensionnement qui consiste à déterminer la capacité d'un système qui doit correspondre efficacement à la demande des ressources.
- La phase opérationnelle ou tactique, il s'agit de proposer les solutions de pilotage du fonctionnement d'un système. Par exemple la planification des activités de soins pour un horizon prédéfini. Un équilibre doit être trouvé entre la satisfaction des usagers et l'efficacité de l'exécution.

Parmi les différentes ressources, le volet financier est perçu soit comme une contrainte, soit comme un objectif. La conjoncture fait ce celui-ci domine largement les autres ressources dans le système de santé.

Pour la gestion du capital matériel, il faut retenir que celui-ci doit être maintenu, ce qui nécessite la poursuite des dépenses au-delà de l'investissement et le maintien de personnels qualifiés. Le dimensionnement, la taille et la distribution des installations physiques est une étape importante dans la définition du système de santé. Les mises à niveau et les reconfigurations des installations sont plutôt des décisions stratégiques, ce qui peut entraîner des modifications opérationnelles. Dans la gestion du capital matériel, une attention particulière doit être apportée aux besoins actuels et futurs, avant d'effectuer de gros investissements d'infrastructures.

La gestion des consommables interagit avec d'autres secteurs du système de soins de santé :

- La production et la distribution exigent des infrastructures ad hoc souvent importantes,
- Les ressources humaines sont nécessaires pour évaluer les besoins et l'utilisation des produits.

La gestion des ressources humaines est la partie la plus difficile. Une main-d'œuvre fonctionnelle nécessite un nombre suffisant de ressources formées de façon appropriée dans une variété de rôles. La gestion des ressources humaines doit tenir compte de la formation, du maintien, du recrutement, de l'allocation et l'utilisation des personnels. Des projections de la main-d'œuvre sont nécessaires pour déterminer le meilleur équilibre dans la composition des équipes médicales, leurs distributions et leurs dimensionnements.

I-2.3. Les principaux enjeux du Génie Hospitalier

Comme nous l'avons dit, le système de santé français doit viser une optimisation organisationnelle permettant de maîtriser l'augmentation des besoins de santé. Ainsi, les établissements de santé se contraignent à améliorer leurs structures organisationnelles dues aux pressions financières et politiques. Le génie industriel doit appréhender le milieu hospitalier comme un système complexe. L'objectif visé par le génie hospitalier est identique que celui du génie industriel : l'optimisation conjointe d'une efficacité et d'une efficience globale de l'organisation étudiée. Il ne s'agit pas du seul objectif de la maîtrise budgétaire, il intervient aussi dans un but d'amélioration de la sécurité et de la qualité des soins. Pour cela il est nécessaire de comprendre et maîtriser les activités dans les établissements ainsi de réaliser la gestion efficiente et efficace.

La planification sanitaire a été mise en place à partir des années 1970 et rénovée avec le plan Hôpital 2007. L'offre de soins est supervisée et organisée par les Agences Régionales de Santé (ARS) afin de favoriser une médecine hospitalière de qualité tout en contrôlant le coût. Les ARS avaient ainsi pour mission de définir et mettre en œuvre la politique régionale d'offre de soins hospitaliers, d'analyser et coordonner l'activité des établissements de soins et de déterminer les ressources. Ainsi, de nombreux facteurs imposent de plus en plus une collaboration entre les secteurs public et privé : les progrès médicaux, le partage des plateaux techniques, des équipements, des lits, etc.². À cette fin, les pouvoirs publics proposent une coopération sanitaire entre établissements hospitaliers, médicosociaux et professionnels libéraux pour une meilleure complémentarité et coordination des soins, via des groupements de coopération

² Loi n° 2009-879 du 21 juillet 2009 portant réforme de l'hôpital et relative aux patients, à la santé et aux territoires.

sanitaire (GCS) et des réseaux de santé. Par conséquent, l'optimisation du système de santé consiste à la fois de réfléchir à la « macro » organisation à optimiser, et aussi à l'amélioration du fonctionnement des « micros » établissements (Berman, 2000). Dans un environnement où il existe une combinaison d'établissements qui fournissent divers services, l'optimisation d'un tel système doit comprendre conjointement :

- L'optimisation du processus et de la gestion interne de chaque établissement en respectant leurs propres contraintes ;
- L'optimisation de la répartition des activités entre ces établissements en respectant leurs rôles et responsabilités ;
- L'optimisation des interactions entre ces établissements en respectant les objectifs globaux.

Ces exigences s'accordant avec les nouveaux défis, ont aussi relevées les enjeux du génie hospitalier. Cette tendance est aussi reflétée par l'évolution des travaux de recherche dans le domaine du génie hospitalier.

I-3. Bref état de l'art sur l'évolution des travaux en Génie Hospitalier

I-3.1. Évolution du périmètre des travaux en Génie Hospitalier

En tant que science appliquée, les travaux en génie hospitalier se trouvent toujours confrontés à la question de l'échelle de l'analyse. La diversité des périmètres des travaux de recherche en génie hospitalier est liée, notamment, aux demandes concrètes du système de santé découlant pour parti des nouvelles orientations des politiques de santé. Dans le cas des outils d'aide à la décision mis en œuvre pour l'amélioration de la performance des organisations, la recherche est en effet, confrontée à l'évolution du périmètre de recherche : de problèmes isolés à l'échelle d'activités restreintes et homogènes — correspondant à peu près au service local, à l'échelle des processus complets — correspondant à un établissement appréhendé dans sa globalité, voire un réseau hospitalier. Ces changements d'échelle sont liés, à la fois, au développement et au perfectionnement des études sur les problèmes isolés, et à la demande d'améliorations approfondies sur la performance globales du système de santé.

Les établissements de santé sont aujourd'hui à la recherche l'optimalité dans un sens global, qui est, en générale, différente de la somme des optimums locaux.

Afin d'illustrer la diversité des périmètres, quelques projets dans le domaine du génie hospitalier sont introduits de façon chronologique. Ils couvrent de différents aspects du génie hospitalier appliqué au secteur de santé en France.

I-3.1.1. Travaux de recherche de petit périmètre

Le projet « Hospital Resource Planning » (HRP) a été financé par la région Rhône-Alpes dans le cadre des thématiques prioritaires de 2000 à 2003. Ce projet s'intéressait à la modélisation des pratiques, à l'organisation des moyens, ainsi qu'à la gestion prévisionnelle des ressources humaines et matérielles en milieu hospitalier. L'objectif de HRP consistait à étudier la transférabilité des outils du Génie Industriel dévolus aux systèmes manufacturiers à la gestion des blocs opératoires. Il était basé sur le concept de planification MRP II (Planification des ressources manufacturières).

Un ensemble d'outils du pilotage à moyen et court terme d'un bloc opératoire a été proposé. L'objectif était de prévoir l'utilisation de certaines ressources matérielles (salles d'opérations, lits de réveil, lits d'hospitalisation,...) et l'emploi des personnels, dans l'optique d'une maximisation de la qualité des soins et d'une minimisation des coûts sur ce périmètre spécifique.

I-3.1.2. Travaux de recherche de moyen périmètre

Le projet « Hôpitaux, Regroupement, Partage et Pilotage » (HRP2) a fait suite au projet HRP, a été financé par la Région Rhône-Alpes de 2003 à 2006 (Rapport final projet HRP2). Si le projet HRP situait son action au niveau de la conduite du bloc opératoire, « atelier » de plus forte valeur ajoutée, le projet HRP2 s'est investi sur les problématiques liées à la reconversion et au pilotage des systèmes physiques d'un groupement d'hôpitaux, en s'intéressant notamment au regroupement des plateaux médicotechniques. L'enjeu du projet était d'une part d'offrir, à tous ceux qui ont en charge la conduite d'un projet de transformation ou de conception d'un plateau médicotechniques, un outil informatisé d'aide à la décision, de validation et d'évaluation des options, et d'autre part de leur donner un référentiel d'outils structurant de bonnes pratiques en gestion prévisionnelle et opérationnelle.

L'objectif du regroupement d'établissements hospitaliers publics ou privés est d'assurer une meilleure dispensation des soins, d'une part en répartissant de manière concertée les activités suivant les compétences de chacun, et d'autre part en profitant au mieux des interactions de compétences dans le cadre d'intégration d'activités. Le regroupement sous-entend : réseau de soins et mutualisation de moyens. Le plateau médico-technique est l'un des meilleurs exemples de ressources mutualisées, il définit un outil collectif associant plusieurs disciplines. Sa programmation doit se faire de manière concertée et optimisée. Cette programmation doit être portée par un système d'information de qualité permettant suivi et pilotage. Le regroupement d'activités est, par ailleurs, à la base de la constitution du réseau de soins qui permettra à chaque entité d'atteindre le niveau d'activité minimal nécessaire à la qualité des soins tout en optimisant ses moyens humains et matériels. Ce projet a consisté à rechercher, sélectionner, concevoir et mettre en œuvre des outils d'aide à la décision dans le cadre d'une démarche structurée (guide méthodologique) pour épauler un projet de regroupement de plateaux médico-techniques et définir une organisation de pilotage des ressources humaines et matérielles mutualisées.

HRP2 a permis de proposer une maquette informatique à destination des directeurs des établissements de soins et plus largement à l'usage de tous ceux qui doivent conduire un projet de transformation ou de construction d'une nouvelle infrastructure (plateau médico-technique pluridisciplinaire, service de stérilisation, etc.) ou encore de modification de tout ou partie de leur organisation opérationnelle. Cette maquette offre un outil d'évaluation et de validation de l'impact de différents scénarios de répartition de l'activité hospitalière (ambulatoire, court et moyen séjours) dans chaque spécialité.

I-3.1.3. Travaux de recherche de grand périmètre

Le projet « Hôpitaux en réseau: Prévoir, Partager et Piloter » (HRP3) fait suite au projet HRP2, a été financé par la Région Rhône-Alpes de 2006 à 2009 (Rapport final projet HRP3). Il s'est intéressé au fonctionnement de la filière de prise en charge des urgences. L'ensemble des acteurs composant cette chaîne de production de soins a été précisément analysée. Il en est de même pour les mécanismes de collaboration et de coopération entre ces acteurs. Une série de recommandations a pu, ainsi, être formulée visant à améliorer significativement les performances de la filière. Différents outils d'aide à la décision et de

simulation ont été réalisés. L'ensemble des résultats ont été regroupés sur un site internet qui propose, entre autres, aux professionnels de santé de mesurer quantitativement l'impact des recommandations au moyen d'un outil de simulation.

L'objectif du projet HRP3 était d'élaborer des approches méthodologiques nouvelles pour la conception et le pilotage des systèmes de production de soins complexes qui doivent prendre en charge les patients des filières d'urgence. Rendre efficiente la filière de prise en charge des urgences est complexe pour plusieurs raisons: grande diversité des acteurs ; liberté des patients importante dans leur prise en charge ; difficulté pour les établissements hospitaliers de gérer à la fois leur flux d'activités programmés et le flux des urgences par définition non programmé. Le challenge a été dans un premier temps de comprendre le fonctionnement de cette chaîne complexe de prise en charge, de caractériser les flux (i.e., permanence des soins et urgence), les rôles et missions des acteurs de la pré-hospitalisation, et d'évaluer l'impact des services d'urgence sur le fonctionnement des établissements hospitaliers.

Pour cela un ensemble d'outils d'enquêtes et de modélisation qui a permis de cartographier chacun des acteurs avec différents points de vue (i.e., le modèle des processus, du système de décision, du système d'information, du système physique) a été construit. Cette cartographie a conduit à réaliser un diagnostic de la filière. Ce diagnostic a mis en évidence deux types de faiblesse : une faiblesse structurelle majeure située aux interfaces entre les acteurs et une faiblesse conjoncturelle due à des facteurs environnementaux. En d'autres termes, la filière d'urgence doit faire face à un flux d'activités qui ne relève pas de sa mission première mais qu'elle est contrainte de prendre en charge.

Dans ce même périmètre, le projet « Hôpital : Optimisation, Simulation et évitement des Tensions » (HOST) qui a été financé par ANR (Agence Nationale de la Recherche) depuis 2012, a pour but d'étudier et de développer la modélisation, l'optimisation et la mise en œuvre d'un système d'aide à la décision. Ce système est conçu pour l'anticipation et la limitation des tensions dans les systèmes hospitaliers. À cette fin, HOST propose des règles de comportement pour éviter ces tensions. Les secteurs des urgences et de l'hospitalisation pédiatrique sont particulièrement représentatifs de ces tensions à l'hôpital. Ce projet permet d'identifier, extraire et modéliser les indicateurs de tension pour

l'hôpital en capitalisant des informations issues de sources multiples et hétérogènes : informations médicales, de ville ou de l'hôpital et informations épidémiologiques. Il est conduit ensuite à élaborer un système d'aide capable de modéliser l'apparition de tension et de proposer l'anticipation de tension ainsi établie, en utilisant des modélisations informatiques innovantes comme les systèmes multi-agents, la logique floue. Ce système sera évalué sous deux aspects : pertinence des résultats proposés et aspects ergonomiques. Il s'attachera à identifier et modéliser des actions correctives pour le déroulement des processus métiers, afin d'éviter au mieux les tensions anticipées.

Les résultats de l'application des différents scénarios ont confirmé que le système conçu dans ce projet permet d'anticiper les situations de tension dans un service d'urgence et limiter leurs impacts si elles se produisent.

I-3.2. Différents structures de pilotage

La variabilité du périmètre d'étude en génie hospitalier implique différentes échelles de processus. Plus le périmètre d'étude est grand, plus de services et d'activités sont prise en compte. Du point de vue du système d'information, il s'agit d'un changement d'échelle de l'environnement décisionnel (Taylor, 2011). Un système d'information qui concerne plusieurs processus organisationnels doit interagir avec les centres de décision correspondants. Une décision définie dans le cadre d'un ensemble des centres de décision pour un système décisionnel n'est pas structurée de la même façon de celle établit par un seul centre de décision isolé. En outre, pour décrire correctement la relation entre les centres de décision, la typologie relative aux modèles de système de pilotage selon la vue organisationnelle doit être prise en compte. Plusieurs typologies de modèles du système de pilotage non centralisé ont été proposées dans les travaux de Damien Trentesaux (Trentesaux, 2002), selon éventuelle agencement et moyen d'interaction conçu pour un agencement donnée : l'agencement centralisé ([Figure I-2](#), classe 0) et l'agencement hiérarchique au sens strict ([Figure I-2](#), classe I), faisant référence à la notion de hiérarchie, l'agencement hétérarchique au sens strict faisant référence à l'absence de toute hiérarchie entre entités ([Figure I-2](#), classe III), et celui d'un agencement hétérarchique / hiérarchique au sens large qui est composé par les deux typologies principales ([Figure I-2](#), classe II). Pourtant un agencement peut parfaitement décrire non seulement les relations organisationnelles des décideurs, mais aussi le niveau et l'horizon temporel de la

décision. Dans un agencement hiérarchique, le système pourra posséder un niveau stratégique qui génère les décisions de l'horizon à moyen-long terme (par exemple, création d'une nouvelle unité de soins), il domine un autre niveau opérationnel qui porte un horizon plus court et génère les décisions concrètes de fonctionnement (par exemple, planning des soignants).

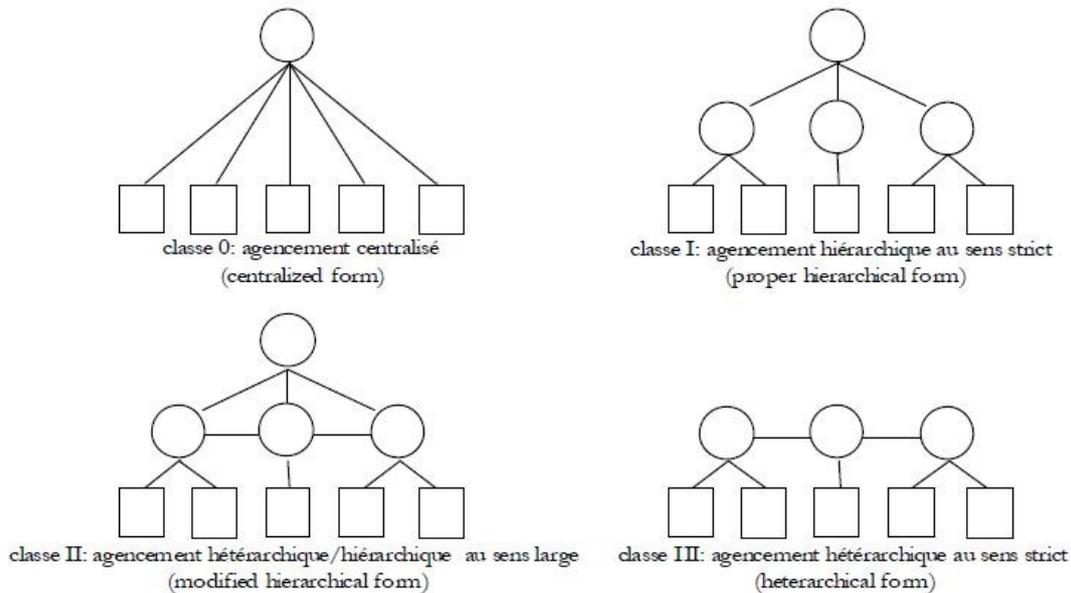


Figure I-2 Les classements d'agencement (Trentesaux, 2002)

Afin de représenter l'émergence et l'évolution de l'organisation du système de santé français, quelques travaux de recherche sont classés en fonction de la structure de pilotage étudié. Une structure de pilotage définit comment les activités telles que la répartition des tâches, la coordination et la supervision sont dirigés vers la réalisation des objectifs organisationnels. Une organisation peut être structurée de différentes façons, en fonction de leurs objectifs et de l'environnement. La structure de pilotage déterminera les modes d'actions dans lesquelles l'organisation fonctionne. Elle affecte l'activité organisationnelle en fournissant la base sur laquelle les procédures et les routines de fonctionnement sont définies. De plus, elle structure les processus de prise de décision dans lesquels les différents décideurs participent.

Trois structures de pilotage sont proposées qui permettent de positionner différents travaux recensés en génie hospitalier : *1-site*, *n-sites* et réseau. La notion

site correspond ici à l'entité organisationnelle, peut être considérée comme le centre de décision.

- Dans une structure *I*-site ou dite centralisée (classe 0 ou 1), les décisions prises par la direction sont généralement communiquées aux niveaux inférieurs de l'organisation qui sont alors censés à accepter et à exécuter d'une manière compatible de ces décisions. Par sa nature hiérarchique, cette structure est caractérisée par l'absence de conflits entre acteurs dépendants et par la faible diversité des interactions possibles. La structure *I*-site peut se référer à l'agencement centralisé et l'agencement hiérarchique au sens strict.
- La structure *n*-sites regroupe de multiples individus où chacun possède une structure centralisée et peu de hiérarchie existe entre ces décideurs (classe 3). Leurs objectifs peuvent être diversifiés. Les interactions sont essentiellement de type synchronisation et coordination. La structure *n*-sites peut se référer à l'agencement hétérarchique au sens strict.
- La structure réseau décrit une structure dans laquelle les décideurs conduisent leurs relations et leurs échanges d'une manière non conflictuelle et non concurrentielle, en cherchant des modalités appropriées pour collaborer dans un objectif commun (classe 2). Cette structure implique plus d'interactions et possède souvent une typologie organisationnelle complexe. Elle peut se référer à l'agencement hétérarchique / hiérarchique au sens large.

I-3.2.1. Structure *I*-site, l'agencement centralisé et l'agencement hiérarchique au sens strict

La structure *I*-site correspond au pilotage centralisé. C'est une structure essentielle parmi les modes d'organisation des établissements de santé. La plupart des travaux de recherche (Chaabane, 2004 ; Mazier, 2010) étudiant les problématiques des structures de pilotage en génie hospitalier considère ce pilotage centralisé. En effet, l'expression des besoins de recherche sont généralement émises de l'intérieur d'un service à périmètre restreint, ce qui est le

cas de la structure de la prise de décision centralisée. Ces travaux ont montré que les hôpitaux ou leurs départements cherchent à minimiser leurs coûts en réduisant les durées de séjour des patients et en éliminant les périodes inactives des ressources afin d'améliorer l'efficacité dans l'utilisation des ressources.

La thèse de Sondes Chaabane (Chaabane, 2004) issue du projet HRP s'intéresse à la gestion des blocs opératoires, qui est un lieu stratégique pour les établissements hospitaliers et un des secteurs les plus importants en terme budgétaire. Selon l'auteur, les dysfonctionnements dans un établissement de soins sont généralement causés par les interventions qui commencent en retard et la propagation de ces retards. L'objectif de ce travail était de gérer des blocs opératoires, à moyen terme et court terme, en s'intéressant à l'emploi des ressources aussi bien humaines que matérielles. Selon l'auteur, la gestion prédictive des blocs opératoires doit être réalisée à partir des prévisions de soins programmés ou estimés, en tenant compte à la fois des contraintes fortes d'emploi du personnel, comme le nombre de praticiens et de personnel paramédical disponible, les périodes de repos, et aussi des critères de qualité tels que les temps d'attente des patients, le nombre de patients en attente. Sur cette base, l'objectif est de minimiser des critères de coûts liés aux heures supplémentaires, aux coûts d'utilisation des équipements, aux coûts des journées d'hospitalisation supplémentaires, etc. La complexité de cette étude était d'une part, l'intégration des contraintes à prendre en compte au niveau humain et d'autre part, la recherche de solutions optimisant un ensemble de critères coûts/efficacité. Les outils de gestion prédictive des blocs opératoires ont été proposés afin de répondre à ces quatre problèmes de gestion identifiés.

Similaire à la gestion du bloc opératoire, la gestion des lits est également sujet d'une prise de décision centralisée. La gestion des lits fait partie intégrante du processus de gestion des flux de patients, qu'ils s'agissent de la répartition de lits au sein des services ou de l'attribution de ceux-ci aux patients. Cela peut devenir un problème important en particulier dans les services spécialisés où des lits sont une ressource fortement contrainte. Le lit dans ce contexte ne représente pas simplement un endroit pour que le patient puisse dormir, mais concerne la prise en charge du patient par l'établissement (l'admission du patient, les consultations et les examens, la planification des personnels et des soins, etc.). Un hôpital ayant un nombre limité de lits, il est donc primordial d'assurer un taux d'occupation élevé. Cela se traduit souvent par une minimisation du nombre

tampon des lits vides. Cependant, comme les demandes d'urgences sont naturellement imprévisibles, les hôpitaux peuvent lors des phénomènes de tension, s'attendre à une pénurie ponctuelle de lits, ce qui entraîne éventuellement l'impossibilité de prendre en charge certains patients.

De par son importance applicative et sa complexité de l'exploitation, de nombreuses recherches existent déjà sur ce problème. La thèse d'Alexandre Mazier (Mazier, 2010) a proposé une démarche de gestion de lits qui couvre les différentes phases de parcours de patients. Puisque la gestion du flux des patients dans les unités de soins est soumise à de nombreuses sources d'incertitudes dues à la présence d'événements aléatoires, ce travail s'est focalisé sur le développement d'outils d'aide à la décision afin d'absorber les perturbations induites. Dans ce problème, la complexité est liée à la maîtrise de la dynamique d'évolution d'un système hospitalier et la capacité à de l'anticiper. En même temps, comme il concerne plusieurs périodes de planification, l'effet propagé de chaque prise de décision est considéré afin de pouvoir envisager son impact ultérieur. Cette intégration des étapes de prise de décisions par le point de vue du flux des patients des urgences rend plus cohérente la charge entre les services et permet que le système puisse fonctionner de façon plus flexible.

Les travaux de recherche sur la structure 1 -site mettent en relief la modélisation et la résolution d'un problème isolé. Dans ce contexte, il existe un seul centre de décision et peu d'interaction avec l'environnement extérieur. Dans le cas de la structure n -sites, est introduite la coordination de centre de décisions multiples.

I-3.2.2. Structure n -sites, l'agencement hétérarchique au sens strict

Dans notre modélisation, la structure n -sites est considérée comme une extension additive du pilotage centralisé car il s'agit d'une juxtaposition parallèle de centres de décision. C'est une organisation dans laquelle il existe une coordination de multiple centre de décision. Ces centres de décision ont une indépendance décisionnelle locale, cependant ils nécessitent certaines phases de coordination afin d'atteindre une cohérence et une performance globale des objectifs prédéfinies. Ce type d'organisation demande en général de faire les compromis entre cet objectif global et les objectifs locaux.

Les travaux de recherche sur l'hospitalisation à domicile (HAD) font partie de ce type d'organisation en génie hospitalier. L'HAD est une forme d'hospitalisation à temps complet au cours de laquelle les soins sont effectués au domicile du patient (sante.gouv.fr, 2014). L'HAD couvre l'ensemble du territoire français. L'objectif de l'HAD est de réduire les charges et les dépenses du système de santé tout en assurant une qualité de service satisfaisante, et également d'offrir les réponses à l'aspiration grandissante de la population à être soignée dans son environnement familial quand la situation le permet. Selon le fonctionnement de l'HAD, les services et les soins sont fournis par de multiples services et des professionnels (médecins traitants, professionnels de santé libéraux ou salariés, officines pharmaceutiques, services à domicile, services sociaux). Par rapport à la structure 1-site, ce sont ces différents acteurs qui réalisent ces activités de soins, médicales et paramédicales, pour les patients géographiquement dispersés. Par conséquent, il est nécessaire de coordonner l'ensemble de ces acteurs afin de gérer les interactions des différents professionnels intervenant dans la prise en charge des patients. Cette caractéristique induit des problématiques d'affectation et d'ordonnancement. Dans sa thèse (Redjem, 2013), Rabeh Redjem a étudié la coordination des ressources appartenant à des établissements différents et intervenant sur la prise en charge du patient. Ce travail a montré l'organisation des structures de l'HAD en France et en région Rhône-Alpes en se basant sur les résultats du projet régional Organisation des Soins À Domicile (OSAD). Le projet a proposé en même temps un ensemble d'outils pour la résolution de la problématique des tournées des soignants en HAD, sous différentes contraintes liées à la réalisation des soins et en particulier aux contraintes temporelles. Les problématiques étudiées consistent dans l'affectation des ressources humaines aux activités de soins et l'ordonnancement de ces activités tout en respectant un certain nombre de contraintes, de préférences et d'objectifs. Selon l'auteur, ces problématiques se situent au niveau de la décision opérationnelle, cependant, elles dépendent fortement des décisions prises, précédemment, aux niveaux stratégique et tactique, tels que l'identification des ressources humaines requises, et l'affectation de ces ressources, etc. Il est donc important que l'établissement d'HAD définisse clairement sa stratégie de coordination afin de réaliser les opérations de façon plus fluides et à moindre coût. Ce travail a montré que certaines contraintes liées à la coordination doivent être considérées dans le modèle de gestion des activités de l'HAD, comme les contraintes de disponibilité des patients, de durée maximale de travail, de séquençement des visites et de

coordination. La prise en compte de toutes ces contraintes compliquent considérablement l'organisation des activités en HAD. Pour cette raison l'auteur a proposé deux modélisations mathématiques basées sur la Programmation Linéaire en Nombres Entiers (PLNE) pour résoudre la gestion de la coordination en HAD. L'objectif est de minimiser les coûts de fonctionnement par la réduction des temps de déplacements et des temps d'attentes des soignants. Néanmoins, à cause de la complexité de calcul qui augmente exponentiellement lorsque la taille du problème augmente, l'auteur a opté pour une heuristique qui permet de générer des solutions d'une qualité assez comparable par rapport aux approches classiques mais dans des temps de calcul plus raisonnables par rapport à la temporalité de la prise de décision dans l'application réelle.

Les travaux de recherche sur la structure n -sites introduisent de multiples centres de décision, pourtant l'interaction entre eux reste relativement simplifiée. La structure du réseau demande une coordination plus sophistiquée, ce qui rend la modélisation et la résolution du problème plus difficile. L'enjeu de ce travail de thèse est justement de proposer une approche générique pour la prise de décisions multi-niveaux en l'appliquant en particulier à la gestion des systèmes de production de soins en réseau.

I-3.2.3. Réseau, l'agencement hétérarchique / hiérarchique au sens large

Dans notre approche, un réseau est similaire à la structure n -sites mais il possède un degré de couplage plus serré entre les sites. Dans le domaine hospitalier, les réseaux correspondent à une organisation d'actions collectives qui sont portées par des professionnels diversifiés en réponse à un besoin de santé d'individus (ANAES, 1999). Dans ce contexte, et contrairement à la structure précédente, les acteurs pris individuellement ne sont pas en mesure d'apporter une réponse, même localement. La constitution des réseaux présente plusieurs intérêts, cela permet aux acteurs d'atteindre meilleur coût de fonctionnement par la mutualisation de leurs ressources et de leurs capacités, ainsi que de faciliter l'accès aux technologies de pointe et l'échange de bonnes pratiques.

Le secteur de la santé a montré des tendances, à la fois, vers l'intégration de plusieurs organisations identiques, mais aussi vers l'intégration de chaînes d'organisations qui couvrent divers aspects des soins aux patients. Les réformes

préconisées dans le secteur de la santé s'appuient sur le constat que l'efficacité des activités de production de soins passe aujourd'hui par la modernisation des infrastructures, des organisations, des modalités de pilotage, la conception et la formalisation de réseaux de production de soins. Cette restructuration pose alors le problème de la répartition des activités mais aussi du choix des stratégies de coordination. Ceci nécessite la reconnaissance des compétences et des responsabilités de chacun, la communication et la collaboration de tous dans le partage des informations, des décisions, des ressources, et des actions. Elle repose sur la mise en place d'un modèle de gestion garantissant la synchronisation de l'ensemble des activités de la trajectoire de soins. Les regroupements et la reconfiguration des structures de prise en charge des patients associant les différents acteurs, médicaux et paramédicaux, de la logistique, hospitaliers et libéraux, définissent le vecteur de restructuration qui permettra d'atteindre les objectifs de qualité des soins et de maîtrise des dépenses de santé. Cette complexité s'exprime notamment dans le niveau stratégique lors de la conception du réseau, lors de sa configuration et parfois de sa reconfiguration dans les situations qui évoluent de façon dynamique. Cette complexité s'exprime également dans le niveau tactique et opérationnel, lorsque les établissements du réseau réalisent les allocations et mettent en œuvre les règles de coopérations des ressources mutualisées. Ces activités opérationnelles ne doivent pas seulement être compatibles entre elles mais elles doivent également se mettre en cohérence vis-à-vis des objectifs globaux. Par conséquent, la formalisation des réseaux de santé crée le besoin de prendre en compte des aspects d'appropriation de ces nouvelles organisations et d'accompagnement aux changements nécessaires à la mise en place de ces nouvelles organisations et des outils nécessaires.

I-3.2.3.1. Réseau de soins des urgences

Un exemple de réseau est le réseau de soins dans la filière des urgences. Le réseau de soins est formé par la collaboration des professionnels de santé de disciplines différentes (y compris travailleurs sociaux), qui répondent, ensemble, aux besoins de santé des individus et/ou de la population, tant au niveau local que sur le plan régional. Il demande une prise en charge de qualité, globale, coordonnée, et décloisonnée. L'objectif du réseau de soins est d'améliorer la qualité des soins et d'assurer la continuité des soins en maîtrisant les coûts engendrés, en étant basé sur la coordination des professionnels de santé. La thèse de Wang Tao (Wang, 2008) issue du projet HRP3 avait pour objectif de proposer

des approches pour améliorer la prise en charge des patients au service d'urgence et en aval des urgences à l'intérieur de l'hôpital. Pour cela, il a fallu élaborer de nouvelles approches méthodologiques pour la conception et le pilotage des systèmes de production de soins complexes dans le contexte de la prise en charge des patients des filières d'urgence.

Le soin des urgences se positionne en amont de la prise en charge des patients. Différents acteurs interviennent dans le réseau des urgences selon leurs rôles et positions sur le parcours de la prise en charge des urgences : les urgences pré-hospitalières, l'accueil et le traitement des urgences, et l'aval des urgences. Puisque le service d'urgence est un maillon pivot de la chaîne des urgences, l'amélioration de la qualité de soins d'urgence doit prendre en compte l'ensemble des acteurs du système. Selon l'auteur, la coordination et coopération du réseau des urgences doit comprendre l'articulation entre la médecine libérale et la médecine hospitalière en amont de la chaîne des urgences dans le cadre de la permanence de soins, la participation des médecins libéraux à la régulation médicale, l'interconnexion des numéros d'appel urgent et des services de secours associés (SAMU, SMUR, Police, SDIS), ainsi qu'en aval des urgences l'organisation des lits d'hospitalisation à travers des conventions signées entre le service d'urgence et les services spécialisés, et entre des établissements hospitaliers et de soins de suite. L'un des travaux réalisés concerne l'interopérabilité entre les différents outils développés dans le cadre du projet visant à optimiser l'ensemble du réseau de la prise en charge des patients d'urgences. Plusieurs études ont été menées : la régulation des flux des patients en amont des urgences à l'aide de la coordination des acteurs, ainsi que l'anticipation de demande de lits dans les établissements de soins de suite. Les interactions entre ces outils peuvent se faire à travers la mutualisation et le partage des données ainsi que la conception des interfaces conviviales. L'auteur a envisagé d'élaborer un outil intégral d'aide à la décision mis à disposition des professionnels hospitaliers pour leur apporter une contribution robuste et concrète pour la maîtrise des dépenses et l'amélioration des services de soins d'urgence.

I-3.2.3.2. Réseau de soins des services médico-sociaux

Un autre exemple est le réseau des services médico-sociaux. Le réseau des services médico-sociaux est un ensemble très vaste dédié à l'accompagnement des personnes fragiles, il est constitué par les établissements de grande diversité au

niveau de leurs prestations et de leurs statuts juridiques (comprenant des établissements publics, des établissements privés sans but lucratif et des établissements privés à but lucratif). Un projet de recherche récent, qui couvre 65 structures d'OVE (SESSAD, IME, ESAT, Foyers d'hébergement...), a l'objectif de créer un outil de pilotage pour ce réseau. Le travail de recherche (Osorio-Montoya et al., 2014) issu de ce projet a proposé une approche d'un pilotage basé sur management par la performance. Une représentation structurée des activités réalisées au sein de ces structures a été conçue, sur laquelle se fonde un outil de suivi d'activité. Un outil de recueil est ensuite capable de mesurer ces données de suivi et les utilise comme support de planification des activités et ressources. L'ensemble des données de suivi issues du recueil des activités est transformé en indicateurs de performance, afin d'alimenter un tableau de bord qui est partagé dans le réseau. L'objectif de ce travail est de se mettre en cohérence des décisions prises dans ce contexte multi acteurs, soit pouvoir prendre une décision au sein de ce réseau en prenant en compte du caractère décentralisé des acteurs autonomes. Ce travail a montré qu'afin de piloter un tel réseau avec une structure relativement lâche et d'adapter le fait que les acteurs soient autonomes, les données de performance peuvent servir comme liaison entre ces acteurs au lieu de décisions prises de façon centralisées.

I-3.3. Genie Hospitalier au niveau international

En plus des implications économiques, la structure globale dont les soins de santé sont organisés varie largement selon le système politique respectif du pays. Par exemple, aux États-Unis, le gouvernement joue traditionnellement un rôle direct moins important par rapport aux autres pays développés comme la France (World Health Organization, 2000), pour des raisons diverses qui sont souvent un sujet de débat politique et économique. En Chine, les établissements hospitaliers sont en général publics mais la politique leur demande d'être financièrement autonome. Ces diversités politiques entraînent différentes stratégies de résolution de problèmes dans le cadre du génie hospitalier, notamment à échelle de la structure en réseau. Cela implique une coordination inter-établissement dans un niveau de pilotage plus élevé. Pourtant l'exigence des performances locales reste cohérente quel que soit la stratégie du pays.

Par conséquent, dans un contexte politique et économique spécifique, la recherche d'une efficacité plus globale d'un système de santé se relève être le

nouveau défi en génie hospitalier. Cela demande d'avoir un cadre général destiné à intégrer plusieurs problèmes d'optimisation qui présentent en général un haut degré de fragmentation dans les travaux de recherches et les applications réelles.

I-4. Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir présenté brièvement les aspects du système de santé français, nous avons présenté les enjeux et les missions du génie hospitalier. Nous avons analysé, dans un deuxième temps l'évolution des travaux de recherche en génie hospitalier en fonction de l'émergence de nouvelle structure de pilotage, qui passe de la situation mono décideur à la situation dans laquelle il y a de multiples centres de décision. Cette émergence de ces nouvelles structures de pilotage nécessite de nouveaux schémas organisationnels (Trentesaux, 2002), qui nécessite de relever l'enjeu de la conception de méthodes plus adaptées au pilotage d'un système possédant un agencement hétérarchique / hiérarchique au sens large. La complexité n'est pas reflétée seulement sur l'existence des relations hiérarchiques et hétérarchiques, mais aussi sur l'existence d'une typologie spécifique du processus décisionnel.

Le chapitre suivant présente un projet de mutualisation de ressources de production dans un réseau de santé, qui a été réalisé notamment dans le cadre de cette thèse. Ce projet possède les caractéristiques de la structure de pilotage de réseau, et au-delà de ça, un agencement hiérarchique des niveaux décisionnels est intégré dans le problème étudié, ce qui rend ce problème plus complexe.

Chapitre II :

Projet de mutualisation de ressources de production dans un réseau de santé

II-1. Introduction

Ce projet porte sur la conception d'un réseau logistique de mutualisation de ressources de production destiné au circuit du médicament. Ce projet a été réalisé au sein du Centre Interrégional pour l'Organisation Hospitalière (CIROH), qui est une plateforme de valorisation attachée au laboratoire LASPI. Ce projet a été conduit sur toute l'année 2012. Le projet s'est appuyé sur un ensemble des établissements de santé de la Mutualité française de la Loire comme site d'application. Toutefois, l'approche proposée devait conserver un caractère générique pour pouvoir être appliqué à d'autres réseaux. D'autres membres du CIROH dont Thibaut Deville, stagiaire de master 2 en Génie Industriel, ont aussi participé à ce projet et ont contribué au le travail de cette étude.

II-2. Description du projet

II-2.1. *Contexte et enjeux*

La gestion du médicament dans les établissements de santé français connaît actuellement une phase importante de changements, initiée avec le Contrat de Bon Usage du Médicament (CBUM). Ce contrat a pour objectif d'améliorer et de sécuriser son circuit au sein des établissements de santé et de garantir son bon usage pour le patient^{3,4}. L'établissement hospitalier, sur la base de l'état des lieux, souscrit à des engagements relatifs aux médicaments ou aux produits et prestations qui prennent la forme d'un programme pluriannuel d'actions qui doit porter a minima sur les points suivants :

- l'informatisation du circuit du médicament et du circuit des produits et prestations ;

³ Décret n°2005-1023 du 24 août 2005 modifié par le décret N°2008-1121 du 31 octobre 2008.

⁴ L'article L. 162-22-7 du code de la sécurité sociale.

- le développement de la prescription et de la dispensation à délivrance nominative ;
- la traçabilité de la prescription, à l'administration pour les médicaments ou à l'utilisation pour les produits et prestations ;
- le développement d'un système d'assurance de la qualité ;
- par ailleurs, pour autant que l'établissement de santé soit concerné, la centralisation de la préparation et de la reconstitution des traitements anticancéreux sous la responsabilité d'un pharmacien.

Il existe aussi plusieurs dispositifs qui incitent les établissements de santé à la sécurisation de la prise en charge médicamenteuse et à la dispensation à délivrance nominative. Le CBUM incite l'établissement à souscrire à des engagements relatifs aux médicaments notamment par l'informatisation du circuit du médicament et le développement de la prescription et de la dispensation à délivrance nominative. L'arrêté du 6 avril 2011 relatif au management de la qualité de la prise en charge médicamenteuse et aux médicaments dans les établissements de santé a indiqué que, le pharmacien doit assurer dans son intégralité l'acte de dispensation du médicament, associant à sa délivrance : l'analyse pharmaceutique de l'ordonnance médicale si elle existe, la préparation éventuelle des doses à administrer, la mise à disposition des informations et les conseils nécessaires au bon usage du médicament.

Par conséquent, dans le même objectif et dans la continuité du CBUM, les établissements de santé sont incités à mettre en place la Dispensation à Délivrance Individuelle et Nominative (DDIN). Ce nouveau mode de distribution des médicaments aura un impact important sur l'organisation des services de soins et de la pharmacie centrale. L'activité logistique (livraisons internes ou externes) nécessitera en particulier un nouveau schéma organisationnel.

Ce changement qui s'impose est susceptible d'engendrer des investissements et des coûts de fonctionnement conséquents. L'enjeu pour les établissements est de concevoir une nouvelle organisation qui, tout en intégrant les nouvelles contraintes réglementaires, minimisera le coût de la gestion du circuit du médicament. Pour atteindre cet objectif tout en restant garant de l'atteinte des objectifs de qualité et de délais, il faut travailler sur l'efficacité du

nouveau processus de gestion du médicament, qui se définit comme l'adéquation entre les ressources, humaines et matérielles, et l'activité.

II-2.2. Dispensation à Délivrance Individuelle et Nominative (DDIN)

Lors de l'étape de délivrance des médicaments, la dispensation à délivrance individuelle et nominative exige que les médicaments soient transformés en doses nominatives. Ils sont liés à un patient dans un dispositif de délivrance, pour une période prédéterminée selon les organisations (journalière, hebdomadaire, bihebdomadaire, mensuel,...). À l'opposé, la délivrance globale est caractérisée par la présence permanente d'une dotation de médicaments dans l'unité de soins. Le contenu de cette dotation est déterminé conjointement par le pharmacien et l'unité de soins. Il existe aussi un mode intermédiaire, la délivrance dite « reglobalisée », qui se différencie du circuit en dispensation à délivrance individuelle et nominative par le fait que les médicaments sont délivrés à une unité de soins de manière globale en quantité correspondant aux besoins des patients pour une période donnée au vue des prescriptions. Dans ce cas, la préparation des doses unitaires est assurée par l'infirmière.

La dispensation à délivrance individuelle et nominative peut être réalisée de façon : manuelle ou automatisée. Le système automatisé répond à deux objectifs : un objectif de sécurisation par la réduction de l'iatrogénie médicamenteuse évitable, et un objectif économique par la réduction du besoin en ressources humaines.

Un système automatisé de la distribution de médicaments à délivrance individuelle et nominative est mis en place, généralement que, pour certaines formes orales (sèches ou liquides) et parfois, pour toutes formes de dosage pouvant être fournies automatiquement au patient sous forme d'emballage individuel. Selon la sécurisation du circuit du médicament⁵, ce système vise à minimiser la manipulation de produits médicaments par le personnel soignant pendant la phase de préparation. En effet, dans les services de pharmacie en

⁵ Ministre du travail, de l'emploi et de la santé. Arrêté du 6 avril 2011 relatif au management de la qualité de la prise en charge médicamenteuse et aux médicaments dans les établissements de santé. JORF n°0090 du 16 avril 2011 page 6687 texte n° 14.

milieu hospitalier traditionnel, la manipulation manuelle peut entraîner : des erreurs préjudiciables au patient et, une utilisation inopportune des ressources en personnels soignants. S'agissant d'un transfert conséquent de tâches répétitives, consommatrices de temps et potentiellement dangereuses en cas d'erreur humaine, les systèmes automatisés de distribution de médicaments à délivrance individuelle et nominative ont été développés et évalués dès les années 1960. Ils ont démontré leur capacité à réduire de manière significative les taux d'erreur humaine. Ils peuvent être distingués des systèmes de distribution des médicaments traditionnels de deux façons fondamentales :

- Tous les médicaments sont distribués en dose exacte respectant la prescription, sous forme de prêt-à-administrer, étiqueté pour un patient particulier, et ne nécessitant pas de mesures ou des manipulations supplémentaires avant leur administration au patient.
- Une seule dose de médicament est distribuée à la fois au patient. Cette dose doit être donnée au patient pas plus de quelques heures avant son administration, pour un approvisionnement qui ne dépasse pas 24 heures. Si une fourniture correspondant à plus de 24 heures de traitement est distribuée une fois, elle sera sous-divisée en doses suivant les prescriptions spécifiques.

Malgré l'ensemble de ces dispositions, la première enquête européenne des services de pharmacie en milieu hospitalier (Delaney, 1996), réalisée en 1995 par l'Association européenne de la pharmacie hospitalière, a révélé que la délivrance individuelle et nominative n'est pas très répandue : seulement 6,5 % des hôpitaux qui ont répondu utilisaient de tels systèmes. Une autre étude de la distribution des médicaments et des pratiques de l'administration des États-Unis en 1999 (Ringold et al., 1999) a établi que les trois quarts des hôpitaux centralisaient leur pharmacie, et que 77 % d'entre elles n'étaient pas encore automatisées. Les grands hôpitaux et ceux affiliés aux Facultés de médecine étaient plus susceptibles d'avoir une composante des services de pharmacie décentralisées. Environ la moitié des hôpitaux interrogés ont déclaré avoir des processus alternatifs de distribution des médicaments qui contournait la pharmacie. Plus encore, certains hôpitaux ont déclaré emprunter les médicaments d'autres patients ou faire usage de fournitures cachées.

Le développement de la dispensation individuelle et nominative et l'évolution de la productivité en établissement de santé contribuent à l'automatisation de la préparation des traitements des patients, comme dans l'industrie, il existe pour les pharmacies une grande variété d'automates de production (Gard, 2008).

La production automatisée des doses médicamenteuses, malgré certains travaux préliminaires comme l'informatisation des prescriptions et l'interfaces vers des automates, montre un impact positif sur les plans techniques et hospitaliers. La pharmacie hospitalière peut utiliser des techniques avancées qui ont fait leurs preuves dans l'industrie ou dans les laboratoires de biologie. L'automate permet de centraliser la tâche sans mobiliser les personnels. La direction des soins reconnaît un gain de temps infirmier important. Le respect de la qualité et de l'hygiène est incontestable. Cependant, le gestionnaire ne dispose pas toujours de réponses objectives sur leur organisation et encore moins sur le retour sur investissement (Kheniene et al., 2008 ; Delorme et al., 2004), car celui-ci est lié fortement à l'implémentation à l'utilisation d'un tel système complexe.

II-2.3. Objectifs du projet

Pour les grands hôpitaux, qui ont un flux logistique conséquent, un tel système de la dispensation individuelle et nominative conduit à une réduction suffisamment importante du besoin en ressources humaines pour amortir l'investissement initial. En revanche, pour des établissements hospitaliers de plus petite taille, l'investissement sera difficilement amortissable au regard du faible volume à traiter. Ainsi, ce système bien que très performant est principalement conçu pour des utilisateurs ayant un volume important. Pourtant, comme nous l'avons vu, il serait intéressant, du point de vue de la sécurisation du circuit du médicament, de permettre à ces petits établissements d'avoir accès à ce genre de dispositif.

Une solution possible est de mutualiser, cette coûteuse ressource, sur plusieurs utilisateurs géographiquement dispersés. Cependant la mise en œuvre d'une telle solution engendre des problèmes logistiques. Cette disposition recentralisée génère des tâches récurrentes de transport. Si, dès la phase de conception, l'organisation de cette structure logistique n'est pas adaptée et

optimisée, les coûts de fonctionnement à long terme pourraient contrebalancer, voire dépasser des économies faites par la mutualisation des ressources.

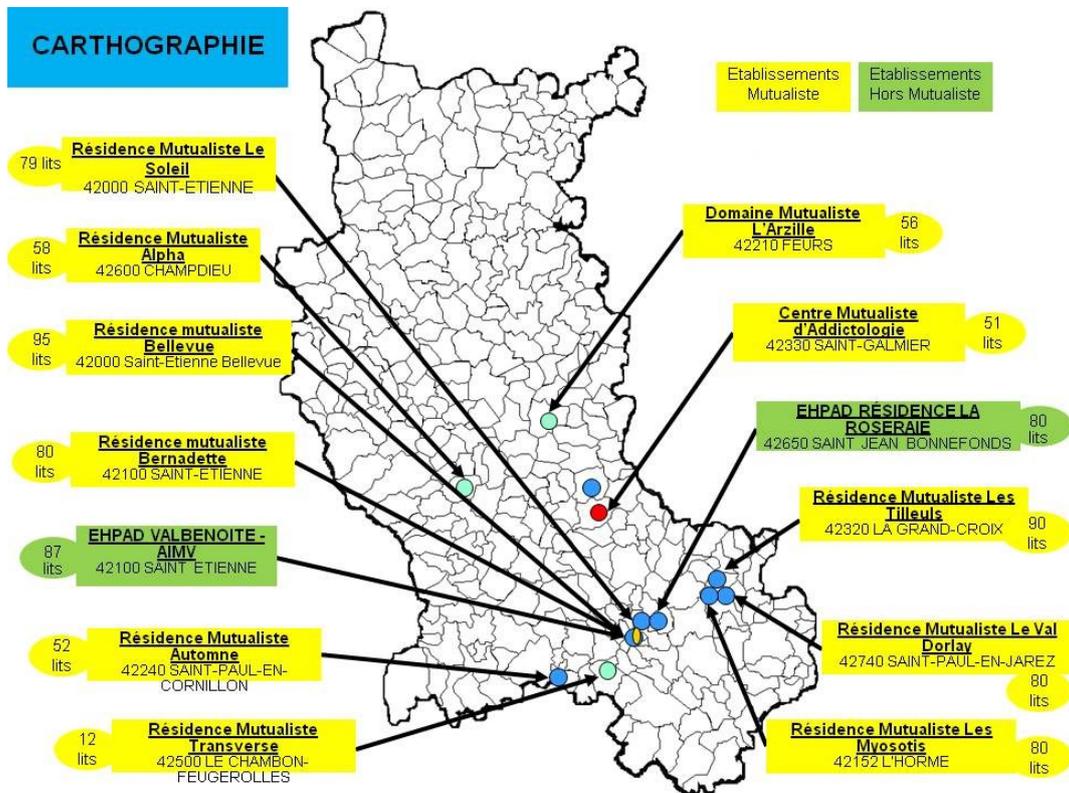


Figure II-1 Cartographie des établissements participants du projet

Un tel projet a été initié par la Mutualité Française de la Loire afin de mettre en œuvre d'un système centralisé de dispensation nominative individuelle. Le projet regroupait 13 établissements médico-sociaux (principalement des EPHAD) et des cliniques dans le département de la Loire (*Figure II-1*). Le groupe pouvait être étendu à l'avenir aux établissements dans les départements voisins. L'objectif était de passer d'une distribution de médicaments traditionnelle à une dispensation nominative individuelle et journalière en « prêt à administrer », pour l'ensemble des établissements. Il s'agissait d'assurer la qualité de la dispensation et de l'administration des médicaments aux patients hospitalisés, de réduire l'incidence des erreurs et des manipulations des médicaments avant leur administration, enfin d'améliorer les conditions d'hygiène et l'utilisation et le suivi des médicaments.

La caractéristique commune de ces établissements est leur petite taille (entre 20 et 90 lits) qu'elle n'est pas suffisante pour équiper chacun d'eux d'un système de la dispensation nominative individuelle. Dans ce contexte, il est nécessaire de réorganiser les processus de dispensation des médicaments pour diminuer l'impact de la mise en service de ce système de production robotisée tout en respectant les contraintes d'aspect économique (voir [Annexe A](#), [Annexe B](#) et [Annexe C](#)).

La [Figure II-2](#) illustre le processus du circuit des médicaments actuel et celui découlant de l'implantation du système de dispensation individuelle et nominative mutualisé.

Les établissements disposent soit d'un stock approvisionné de médicaments dans leur propre pharmacie à usage intérieur (PUI), soit d'une sous-traitance d'approvisionnement, dans ce cas l'établissement achète le service de délivrance des médicaments auprès des pharmacies de ville (PdV). Dans le cadre du projet, le mode de délivrance actuel est une délivrance reglobalisée. La commande est faite en fonction des prescriptions, et la préparation individuelle est faite au moment de l'administration par les infirmières. Le coût total de ce mode de délivrance est composé d'un coût lié à l'achat individuel, un coût lié au stockage des médicaments, et un coût lié aux salaires des pharmaciens notamment en PUI, et des infirmières. En plus, ces coûts sont présentés à chaque établissement.

L'objectif de ce projet est de passer du processus actuel au processus basé d'un système mutualisé de robots de préparation. Une fois les robots déployés, les établissements participants centralisent les prescriptions à ces centres. Les centres commandent les médicaments de façon globalisée et réalisent la préparation individuelle automatiquement. Ce nouveau processus peut faire baisser le coût d'achat, et les main-d'œuvres des pharmaciens et infirmiers. Une fois que la production destinée aux établissements d'une même tournée est terminée, un transporteur est chargé de livrer à chaque établissement pour une quantité équivalente à l'utilisation hebdomadaire.

Dans ce cas-là, il existe uniquement une seule PUI centrale à gérer, mais ce processus crée un coût d'investissement du système automatisé et un coût lié à la logistique. L'objectif du projet est donc de rendre la conception de ce nouveau

processus économiquement viable et amélioré, sachant que la qualité de service sera forcément améliorée.

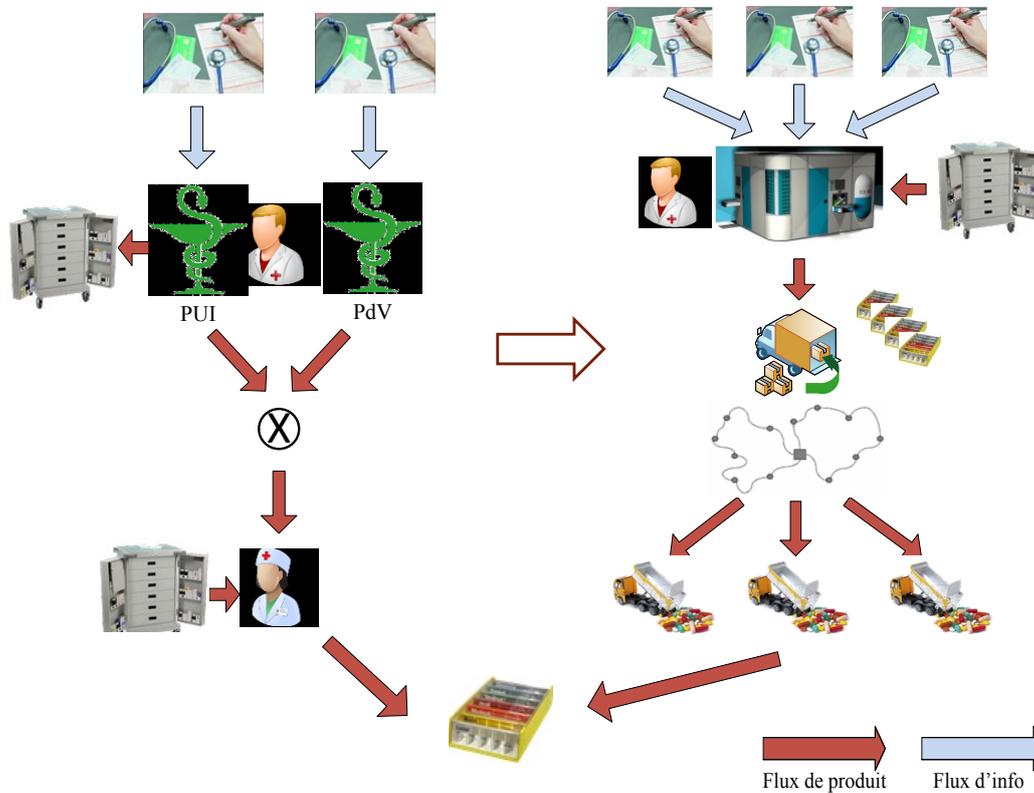


Figure II-2 Processus du circuit des médicaments avant et après l'implantation du système DDIN mutualisé

Ce projet consiste à concevoir une structure logistique spécifique d'un ou plusieurs centres de production et distribution. Cela nous amène à répondre aux questions suivantes :

- D'abord, une question stratégique qu'est la localisation de(s) centre(s) de production, c.-à-d. le choix parmi un ensemble de sites candidats, sachant que ces candidats sont aussi les clients.
- Ensuite, c'est une question tactique, pour déterminer la caractérisation des centres compte tenu des contraintes d'approvisionnement, y

compris le dimensionnement des ressources, et la liste des clients affectés à chaque centre.

- À la fin, une question concerne les opérations quotidiennes, l'organisation des livraisons et de production, comme le planning de production est en effet lié directement à la liste des clients à livrer lors d'une tournée.

II-3. Approche de résolution

II-3.1. Approche simplifiée

Le nombre de centres nécessaires est déterminé en fonction de la capacité de production du système de dispensation nominative individuelle et les demandes des établissements. Dans cette approche simplifiée et pour répondre au cahier des charges du partenaire (Mutualité de la Loire), les hypothèses suivantes ont été prises :

- un seul centre suffira pour couvrir le besoin ;
- Pour être en capacité à absorber une hausse future de la consommation, la capacité de production de ce centre sera supérieure au besoin actuel.

L'étude initiale s'est déroulée en plusieurs étapes. Les profils de consommations des médicaments et les coordonnées géographiques de tous les établissements ont été recueillis pour établir les paramètres du problème. Le processus de décision a été décomposé en deux étapes successives. La première étape cherche à déterminer le meilleur emplacement du centre ou des centres de production et distribution afin d'optimiser les coûts de transport, et de rendre le système accessible en terme de couverture. Une fois ces emplacements déterminés, on cherche à programmer les tournées journalières de véhicules en fonction des contraintes identifiées par l'étude du terrain. Ces tournées serviront de cadre de décision pour le programme de production du système automatisé. La dimension « capacité » des véhicules et la dimension « capacité » du système de production sont donc fortement corrélées.

Comme nous l'avons précisé, dans cette approche simplifiée et pour répondre aux demandes de tous les établissements, un seul système automatisé

sera mis en place dans le centre de production et distribution. Celui-ci est largement capable de couvrir le besoin actuel des établissements. Il doit produire l'ensemble des sachets correspondant à une consommation hebdomadaire d'un établissement en une journée, puis les livrer le jour même de cette production. Il est important d'avoir un planning de production établi sur la semaine pour mieux dimensionner ce système automatisé de production.

Avec cette hypothèse, le planning de production est implicitement lié à l'ordre de livraisons des sachets aux établissements. C'est-à-dire, si l'on doit livrer l'établissement B puis A et C, nous produirons dans un même ordre : B, A et C. Cependant, il se peut que certaines commandes non prévues et urgentes viennent se greffer à ce planning initial. Le travail de Ben Bachouch et al. (Ben Bachouch et al., 2007) a pris en compte ce problème dans un contexte différent, celui de la gestion des lits dans un établissement de santé. Leur modèle assigne des patients à des lits disponibles en respectant la date du début d'hospitalisation au plus tôt et au plus tard des patients. D'autres travaux (Kim et al., 2000; Bechar et Guinet, 2006) utilisent un algorithme pour l'insertion des patients suivant leur ordre d'arrivée et un programme linéaire pour la replanification des patients pour lesquels la date d'hospitalisation n'a pas été encore confirmée. Ces modèles restent une référence pour ce projet dans le sens où les commandes imprévues pourraient être affectées à un moment disponible dans le planning de production.

Afin de livrer les établissements après la production réalisée en maîtrisant le coût de cette opération logistique, les moyens de transport doivent être organisés de manière optimale sous contraintes telles que la capacité de véhicules, les demandes de clients. Il s'agit ainsi d'un problème de la classe Vehicle Routing Problem (VRP) ou Problème de Tournées de Véhicules. C'est un problème d'optimisation combinatoire appartenant à la famille des problèmes de transport, il constitue une extension du problème du voyageur de commerce (Traveling Salesman Problem, TSP) qui intègre notamment la dimension « capacité » des véhicules. Plusieurs travaux ont été réalisés sur ce type de problème, en utilisant la méthode exacte ou heuristique. Lorsque la taille du problème devient trop importante, la méthode exacte atteint souvent ses limites car le VRP est un problème NP-difficile. Vu le nombre des établissements, la résolution par la méthode exacte de ce problème initial reste faisable pour un tel modèle de taille modeste. Le travail de Golden et al. (Golden et al., 1977) introduit un modèle mathématique sur le VRP permettant de résoudre les problèmes liés aux tournées

logistiques. Dans son modèle il ajoute une contrainte de capacité sur les véhicules, alors que dans le cas de ce projet elle sera transformée en capacité de production de l'automate.

II-3.1.1. Localisation du centre

Les principales questions à se poser commencent par celle concernant la localisation du centre à déployer. En effet, pour concevoir un réseau logistique, la disposition du centre de production est une décision dominante. Ce dernier doit être à la fois, bien situé par rapport aux trajets de livraison, et offrir une capacité suffisante. Pourtant, les trajets de livraison sont fortement dépendants du choix de localisation. Ainsi, il est impossible de prendre en compte ces tournées dans la décision de localisation si on respecte cet ordre de décision. Pour estimer approximativement le trajet de livraison, une méthode d'évaluation des tournées en marguerite est utilisée afin de trouver un emplacement susceptible d'être intéressant géographiquement. La contrainte formulée par le partenaire était de placer ce centre de production dans un des 13 établissements participants. La méthode des tournées en marguerite évalue la distance totale des allers-retours de livraison vers d'autres établissements, et cherche à identifier la localisation du centre de production qui minimise cette distance totale (1).

On peut formuler cette évaluation sous forme d'un modèle linéaire en nombres binaires. Le vecteur $V = \{1, \dots, n\}$ liste l'ensemble de sites à prendre en compte. Ils sont en même temps clients et centre de production candidats. Une matrice d_{ij} indique les distances de trajet entre les sites i et j , ainsi $i, j \in V$ et $i \neq j$.

Les variables de décision sont : $x_i \begin{cases} = 0 \\ = 1 \end{cases}$, x_i vaut 1 si et seulement si l'établissement i est choisi comme l'emplacement de centre. Un seul centre de production sera choisi (2).

Fonction objective :

$$\text{Min} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{ij} x_i \quad (1)$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{i \in V} x_i = 1 \quad (2)$$

$$x_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V \quad (3)$$

Le résultat permet d'avoir un centre relativement proche du « centre de gravité » de toutes les localisations des établissements, ce qui favorise potentiellement la diminution des coûts des tournées de véhicules. Selon les résultats d'évaluation des tournées en marguerite, l'établissement « résidence mutualiste Bernadette » classé en premier sur la liste des candidatures sera sélectionné pour accueillir le futur centre de production. Comme il existe un seul centre, l'affectation des clients au centre n'est plus nécessaire, il ne reste que le problème de tournées de véhicules à traiter.

II-3.1.2. Tournées de véhicules

Les tournées de véhicules consistent à planifier des itinéraires de véhicules afin de desservir l'ensemble des établissements à partir du centre de production localisé dans l'étape précédente, sous contraintes telles que :

- chaque client est servi par un seul véhicule,
- chaque véhicule fait une tournée en partant du centre et revenant au même endroit,
- les capacités des véhicules doivent être respectées,

L'objectif de l'optimisation des tournées de véhicules est de minimiser les coûts de transports et de véhicules.

Dans cette approche, nous assimilons la tournée d'un véhicule à la programmation d'une journée de production. Ainsi l'ensemble des clients livrés sur la même tournée auront leurs médicaments préparés sur la même journée.

On peut formuler ce VRP sous forme d'un modèle de programmation linéaire en nombres entiers. Pour cela on définit $V = \{0, 1, \dots, n\}$ soit l'ensemble de sites où 0 est le centre, 1, ..., n sont les clients, K soit l'ensemble de véhicules correspond à l'ensemble des K jours de production de l'automate. Les données d'entrée sont les suivantes :

- q_i , soit le demande du client i ,
- Q , soit la capacité d'un véhicule assimilé ici à la capacité du robot de préparation,
- d_{ij} soit la distance entre les sites i et j ,
- C_1 , soit le coût fixe d'un véhicule,
- C_2 , soit le coût unitaire du trajet au kilomètre.

Les variables de décision sont les suivantes :

- $x_{ijk} \begin{cases} = 0 \\ = 1 \end{cases}$, elle vaut 1 si et seulement si l'arête (i, j) est traversée de i vers j dans la tournée réalisée par le véhicule k ,
- U_i^k , soit l'ordre de visite de chaque site i par le véhicule k .

Fonction objective :

$$\text{Min} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} d_{ij} x_{ijk} C_2 + \sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{0jk} C_1 \quad (4)$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in V, i \neq 0 \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} q_i x_{ijk} \leq Q \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} - \sum_{j \in V} x_{jik} = 0 \quad \forall k \in K, i \in V, i \neq 0 \quad (7)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0jk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$U_i^k + 1 \leq U_j^k + M(1 - x_{ijk}) \quad \forall (i, j) \in V, k \in K \quad (9)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in V, k \in K \quad (10)$$

$$U_i^k \geq 0, U_i^k \in Z \quad \forall i \in V, k \in K \quad (11)$$

La fonction objective (4) mesure les coûts des tournées de véhicules : le coût de transport en fonction des trajets et le coût fixe de véhicules. La contrainte (5) spécifie qu'un client n'apparaît que sur une et une seule tournée, et que chaque client n'a qu'un seul prédécesseur. La contrainte (6) porte sur le respect de la capacité des véhicules. La contrainte (7) indique que le flux entrant doit être égal au flux sortant. La contrainte (8) montre qu'une tournée n'est affectée qu'à un seul véhicule. La contrainte (9) sert à éviter les sous-tours.

Ce modèle permet de rechercher les solutions faisables du VRP en respectant des exigences demandées en termes de la capacité des véhicules et en minimisant le coût total de la logistique, y compris l'investissement pour les véhicules et la consommation sur les trajets.

Tableau II-1 Caractéristiques du projet de la Mutualité de la Loire

<i>nombre du système DDIN</i>	1
<i>capacité de production</i>	1500 sachets/h
<i>nombre des établissements</i>	13
<i>demande hebdomadaire</i>	24864 sachets
<i>coût unitaire du véhicule</i>	3000
<i>coût unitaire du trajet</i>	1
<i>capacité du véhicule</i>	10500

Les informations liées au problème de ce projet sont listées au [Tableau II-1](#). Sachant que le problème VRP est NP-difficile au sens fort, il généralise le problème TSP qui a une complexité de $O(n!)$. Par conséquent, même avec 13 établissements la détermination de la solution optimale par une méthode exacte s'appuyant sur ce modèle de programmation linéaire est trop coûteuse en temps. Avec un critère d'arrêt basé sur le temps de résolution de 5 400 secondes, la meilleure solution a trouvé 9 252 comme la valeur de performance de la fonction objective, qui représente le coût hebdomadaire du réseau de mutualisation. Pour faciliter la comparaison aux approches suivantes et évaluer le retour sur investissement, nous déterminons le coût du réseau pour une durée de 5 ans, le [Tableau II-2](#) présente ces informations.

Tableau II-2 Différents coûts liée à l'investissement du projet de la Mutualité de la Loire

<i>coût hebdomadaire des distances parcourues</i>	252
<i>coût du véhicule</i>	9000
<i>coût d'ouverture du centre</i>	30000
<i>coût 5 ans du réseau</i>	104520

Cette approche initiale a permis de fournir une première solution aux exigences du projet, elle a répondu successivement d'une question stratégique liée à la localisation du centre et d'une question tactique concernant les tournées de véhicules. Cette approche apporte la simplicité et l'efficacité à la résolution du problème grâce au concept simple du projet actuel, les demandes des établissements sont suffisamment réduites pour qu'un seul centre suffise pour satisfaire la production des sachets de médicaments de tous les patients. Cependant, il a été défini au départ dans ce projet que le réseau doit rester extensible afin d'accueillir au fur et à mesure une hausse de la demande issue soit des établissements déjà présent, soit d'autres établissements non intégrés à ce jour. Cette approche initiale rencontrera ses limites lorsqu'une configuration multi-centre deviendra préférable. Un réseau logistique avec plusieurs centres de production ajoute, non seulement, un niveau décisionnel d'affectation des clients aux centres entre le niveau décisionnel de la localisation et celui des tournées de véhicules, mais crée aussi une corrélation forte entre ces niveaux décisionnels. Il est impossible d'évaluer un emplacement de centre sans a priori connaître son affectation des clients et les tournées entre eux. De ce fait une approche intégrée qui encapsule tous ces sous-problèmes semble à privilégier.

II-3.2. Approche intégrée

II-3.2.1. Méthode exacte

Selon les besoins d'extension du projet, le problème peut être considéré comme un problème de localisation et de routage (Location & Routing Problem, LRP). Trois décisions doivent être prises conjointement : (1) le nombre, l'emplacement et le dimensionnement des centres de distribution de médicaments à délivrance individuelle et nominative doivent être identifiés parmi une liste de

candidats, (2) l'affectation des clients à chaque centre, et (3) la tournée de chaque véhicule pour les clients groupés. Compte tenu des réglementations médicales, la durée de stockage de médicaments sous forme d'emballage individuel ne peut dépasser un délai trop important. Dans ce cas, le planning de production sert aussi de planning hebdomadaire des transports. La capacité de production hebdomadaire du système de distribution de médicaments à délivrance individuelle et nominative est définie comme la capacité du centre. Une autre contrainte de capacité est liée à la capacité de charge du véhicule. Sachant que chaque centre candidat est également un client à servir, sa demande de médicaments n'est donc pas comptée dans la charge des véhicules qui lui sont affectés. Ce qui fait la différence par rapport aux problèmes classiques de LRP.

Un modèle de programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) est créé, dans lequel la fonction objective est de minimiser le coût total. Pour cela on définit que $I = \{1, \dots, n\}$ soit l'ensemble de sites considérés comme les centres candidats, $J = \{1, \dots, n\}$ soit l'ensemble de sites considérés comme les clients, $V = I \cup J$ soit l'union des deux ensembles, K soit l'ensemble de véhicules. Les données d'entrée sont les suivantes :

- $q_j, (j \in J)$, soit la demande du client j ,
- Q , soit la capacité d'un véhicule,
- $d_{ij}, (i \in V, j \in V)$, soit la distance entre deux sites i et j ,
- $O_i, (i \in I)$, soit le coût d'ouverture du centre i ,
- $W_i, (i \in I)$, soit la capacité du centre i ,
- C_1 , soit le coût fixe du véhicule,
- C_2 , soit le coût unitaire du trajet au kilomètre.
- $\varepsilon > 0$, soit un nombre réel positif assez petit.

Les variables de décision sont les suivantes :

- $x_{ijk} \begin{cases} = 0 \\ = 1 \end{cases}, (i \in V, j \in V, k \in K)$, elle vaut 1 si et seulement si l'arête (i, j) est traversée de i vers j dans la tournée réalisée par le véhicule k ,

- $y_i \begin{cases} = 0 \\ = 1 \end{cases}, (i \in I)$, elle vaut 1 si et seulement si le site candidat i est choisi comme l'emplacement d'un centre,
- $f_{ij} \begin{cases} = 0 \\ = 1 \end{cases}, (i \in I, j \in V)$, elle vaut 1 si et seulement si le client j est affecté au centre i ,
- $U_i^k \in Z, (i \in V, k \in K)$, soit l'ordre de visite de chaque site i dans la tournée k .

Fonction objective :

$$\text{Min} \sum_{i \in I} y_i O_i + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} d_{ij} x_{ijk} C_2 + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijk} C_1 \quad (12)$$

La fonction objective (12) inclut trois types de coûts, relatifs aux : investissements d'ouverture des centres ($\sum_{i \in I} y_i O_i$) ; investissements en véhicules ($\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijk} C_1$) ; coûts liés aux activités logistiques ($\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} d_{ij} x_{ijk} C_2$).

Sous les contraintes :

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in J \quad (13)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} - \sum_{j \in V} x_{jik} = 0 \quad \forall k \in K, i \in V \quad (14)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (15)$$

$$U_i^k + 1 \leq U_j^k + M(1 - x_{ijk}) \quad \forall (i, j) \in V, k \in K \quad (16)$$

Certaines contraintes comme (13), (14), (16) sont les mêmes que celles dans la formulation de VRP de Golden (Golden et al., 1977). La contrainte (13) spécifie qu'un client n'appartient qu'à une et une seule tournée, et que chaque client n'a qu'un seul prédécesseur. La contrainte (14) indique que le flux entrant

doit être égal au flux sortant. La contrainte (15) assure qu'il n'y a qu'un seul centre par tournée. La contrainte (16) sert à éviter les sous-tours.

$$\sum_{u \in J} x_{iuk} + \sum_{u \in V \setminus \{j\}} x_{ujk} \leq 1 + f_{ij} \quad \forall k \in K, i \in I, j \in J \quad (17)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in J} q_j x_{ijk} \frac{d_{ij}}{d_{ij} + \varepsilon} \leq Q \quad \forall k \in K, \quad (18)$$

$$\sum_{j \in J} q_j f_{ij} \leq W_i y_i \quad \forall i \in I \quad (19)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijk} \leq 5 \quad \forall i \in I \quad (20)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in V, k \in K \quad (21)$$

$$U_i^k \geq 0, U_i^k \in Z \quad \forall i \in V, k \in K \quad (22)$$

La contrainte (17) réalise l'affectation des clients aux centres. La contrainte (18) concerne le respect de la capacité des véhicules, en excluant de la charge le besoin du centre lui-même. La contrainte (19) concerne le respect de la capacité des centres. La contrainte (20) concerne le respect de la production hebdomadaire sur 5 jours ouvrables. Chaque centre n'organise pas plus de 5 tournées par semaine (une par jour), comme la quantité de livraison à chaque tournée est équivalente à la quantité de production journalière programmée pour un centre donné. Cette formulation de LRP est basée du modèle proposé par Prodhon (Prodhon, 2006) à part pour les contraintes (18) et (20) ont été modifiées et ajoutées pour s'adapter à la spécificité du projet.

Le nombre de contraintes du modèle est de l'ordre de $2n^3$, avec n le nombre de sites candidats qui est aussi égal au nombre de clients dans ce problème. Le nombre de variables est de l'ordre de $(2n)^3$. À cela s'ajoute le nombre exponentiel de contraintes de sous-tours (Prodhon, 2006). À part des instances de petites tailles, la résolution exacte de ce modèle reste difficile pour la plupart des solveurs du commerce.

Le modèle PLNE a été résolu en utilisant IBM ILOG CPLEX solveur. La taille de cette instance compte 4394 contraintes et 17576 variables de décision. Le résultat montre que, avec un critère d'arrêt basé sur le temps de résolution de 5 400 secondes, la meilleure solution a trouvé 99320 comme la valeur de performance de la fonction objective, qui présente directement le coût du réseau d'une durée de 5 ans. Par rapport à la valeur de performance de l'approche simplifiée 104520, on peut constater ici que même si la complexité a évolué car le modèle de VRP a été intégré dans le modèle de LRP, l'approche intégrée représente un avantage sur la qualité de solution par sa prise en compte, en cohérence, de tous les niveaux décisionnels.

II-3.2.2. Méthode approchée

Le dernier modèle PLNE a permis de coupler l'ensemble des trois niveaux décisionnels dans un seul modèle afin que la solution soit optimisée de façon globale. Cependant, parmi les trois niveaux décisionnels, le problème de tournées de véhicules est déjà NP-difficile. Par conséquent, pour les instances de grande taille, la durée de résolution par la méthode exacte est encore trop importante pour pouvoir être opérationnelle. Surtout en prenant en compte que le projet doit permettre une extension au niveau du nombre des établissements participants. Il faut alors se tourner vers les approches heuristiques.

Comme les méthodes méta-heuristiques sont généralement des algorithmes stochastiques itératifs qui convergent vers un optimum éventuellement global, le comportement algorithmique de chaque itération est généralement toujours identique. C'est pourquoi pour les problèmes multi-niveaux comme LRP, les prises de décisions multi-niveaux sont difficiles à empiler dans un seul comportement algorithmique itératif qui soit, en même temps, apte à conserver la convergence des décisions. Afin de vérifier cette possibilité, une approche basée sur une méta-heuristique d'optimisation par essaims particulaires (Particle Swarm Optimization – PSO) est développée.

II-3.2.2.1. Optimisation par essaims particulaires (PSO)

De nombreuses méthodes d'optimisation méta-heuristiques trouvent leur fondement dans les systèmes naturels complexes, telles que les algorithmes génétiques (AG), le recuit simulé (SA) et les algorithmes de colonies de fourmis

(ACO) ou d'abeilles (SBC). Ces méthodes ont toutes prouvé leur efficacité dans différents domaines d'application.

La méthode proposée est basée sur un algorithme méta-heuristique : optimisation par essais particuliers (PSO). PSO est un algorithme d'optimisation stochastique qui s'appuie sur la reproduction du comportement social. Développé par Kennedy et Eberhart en 1995 (Kennedy et Eberhart, 1995), PSO s'adapte notamment à la résolution du modèle d'optimisation non linéaire, multimodale. Cet algorithme s'inspire à l'origine de l'observation de simulation informatique des vols d'oiseaux en groupe et de la dynamique des bancs de poissons. Ces simulations ont mis en évidence la capacité des mouvements des individus d'un groupe à maintenir une distance entre eux et suivre une tendance du mouvement global. Ces simulations ont aussi révélé l'importance du mimétisme dans la compétition qui oppose les individus en quête de nourriture. En effet, les individus sont à la recherche de sources de nourriture qui sont dispersées au hasard dans un espace de recherche, et quand un individu localise une source de nourriture, les autres vont ensuite essayer de le suivre. Ce comportement social basé sur l'analyse de l'environnement naturel apporte alors une méthode de recherche en observant les tendances du mouvement global d'un groupe d'individu. Chaque individu cherche à maximiser ses chances en intégrant cette tendance globale pour modérer ses propres expériences locales.

Formellement, chaque particule i a une position $x(i) \in \mathbb{R}^n$ et une vitesse $v(i) \in \mathbb{R}^n$ dans l'espace de recherche. On définit $pbest$ comme la meilleure position connue d'une particule et $gbest$ comme la meilleure position connue de l'essaim des particules. Les paramètres ω , $c1$ et $c2$ sélectionnés par l'utilisateur, qui servent à contrôler le comportement et l'efficacité de PSO, représentent respectivement le coefficient d'inertie des particules, le facteur d'apprentissage de la meilleure position locale et le facteur d'apprentissage de la meilleure position globale. En plus, deux variables aléatoires $r_1, r_2 \sim U(0,1)$ sont intégrées pour introduire de l'aléa dans le comportement des particules. Le pseudo code donné ci-dessous donne la formalisation classique de l'algorithme de la PSO.

```

*****
Pseudo code de la PSO
*****
1 InitializeSwarm()
2 while generation < generation_max do
3   for each particle do
4     for each dimension i do
5        $v(i) \leftarrow \omega * v(i) + c1 * r1 * (pbest(i) - x(i)) + c2 * r2 * (gbest(i) - x(i))$ 
6        $x(i) \leftarrow x(i) + v(i)$ 
7     end for
8     Evaluation()
9     if fitness better then pbest_fitness then
10      pbest_fitness  $\leftarrow$  fitness
11      for each dimension i do
12        pbest(i)  $\leftarrow$  x(i)
13      end for
14      if fitness better then gbest_fitness then
15        gbest_fitness  $\leftarrow$  fitness
16        for each dimension i do
17          gbest(i)  $\leftarrow$  x(i)
18        end for
19      end if
20    end if
21  end for
22  generation ++
23 end while

```

Initialement, les particules sont générées de façon aléatoire avec leurs vitesses initiales dans l'espace de recherche du problème. Chaque particule est représentée par trois paramètres : ses coordonnées qui représentent une solution faisable, sa vitesse qui détermine sa tendance de mouvement et sa valeur de performance qui est évaluée par la fonction objective par rapport sa position actuelle. Pour chaque itération, les particules se positionnent à une nouvelle localisation, le mouvement d'une particule est guidé par : son inertie (dernière vitesse), sa meilleure position vécue (*pbest*), et la meilleure position de ses voisins ou toutes les particules dans l'essaim (*gbest*). Par le biais d'un coefficient d'inertie ω et deux facteurs d'apprentissage *c1* et *c2*, la vitesse et la position de chaque particule sont mises à jour avec les fonctions 22, 23. En outre, comme la PSO fonctionne sur un espace continu, une méthode de la projection doit être appliquée pour relier cet espace continu à un espace en nombre discret modélisé à partir du problème concret.

$$\begin{aligned}
Vitesse_{t+1} = & \omega \times Vitesse_t \\
& + c_1 \times (pbest - Position_t) \\
& + c_2 \times (gbest - Position_t)
\end{aligned}
\tag{22}$$

$$Position_{t+1} = Position_t + Vitesse_{t+1}
\tag{23}$$

L'efficacité de la PSO a été démontrée expérimentalement dans les travaux (Engelbrecht, 2010), pour la résolution des problèmes multimodaux d'optimisation avec des fonctions statiques ou dynamiques, dans des espaces de recherche de grande dimension. Cependant, comme d'autres heuristiques ou méta-heuristiques, la PSO n'a pas été conçue à son origine pour résoudre des problèmes multi-niveaux.

II-3.2.2.2. Approche de résolutions en l'optimisation par essais particuliers

Le concept de PSO demande de définir un espace de recherche qui représente l'espace de solutions du problème. Toutes les informations d'une solution complète sont donc définies dans les dimensions de cet espace de recherche. Une solution complète pour un LRP est composée de trois parties correspondant à la résolution de trois sous-problèmes : la localisation des centres, l'affectation des clients aux centres, et l'organisation des tournées de véhicules. Comme PSO utilise le déplacement des particules dans cet espace de recherche pour procéder à la recherche de l'optimum à travers les coordonnées des particules, toutes les dimensions de l'espace de recherche doivent être traitées uniformément et parallèlement. Cela signifie que les solutions de tous les sous-problèmes évoluent au même rythme. Dans le contexte de ce projet, les solutions des problèmes de localisation, d'affectation et de tournées évoluent en parallèle dans chaque itération.

Une approche de résolutions en méta-heuristiques PSO a été proposée à la suite de la méthode exacte. Cette dernière est testée sur l'instance présentée dans ce projet avec des capacités limitées sur les véhicules et le centre de production. Le résultat est présenté par la courbe de convergence générée ([Figure II-3](#)).

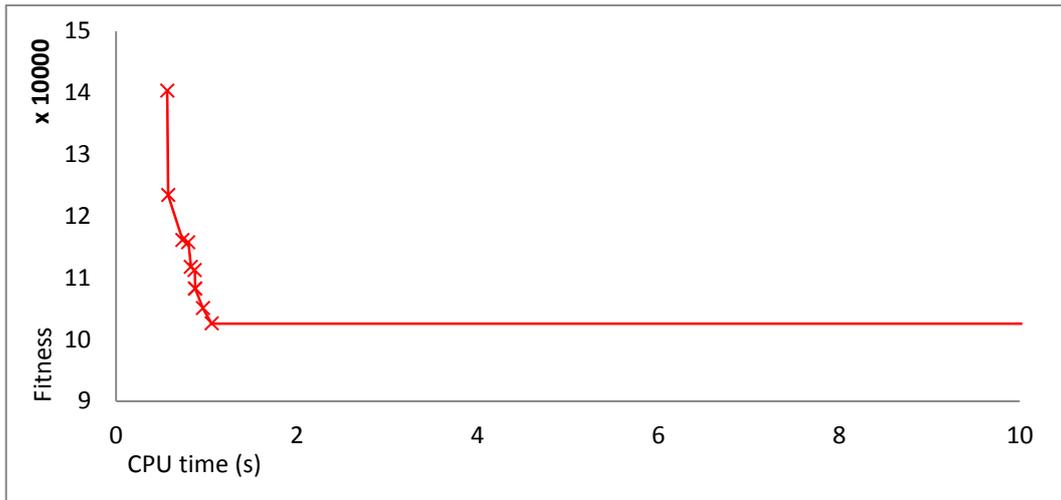


Figure II-3 La convergence de l’approche PSO sur le problème du projet

Il est à noter que la meilleure solution trouvée par cette approche n’est pas aussi performante que celle obtenue avec la méthode exacte. Ainsi, la [Figure II-3](#) montre clairement une précocité de cette approche. Même si avec une relaxation de critère d’arrêt et un nombre plus important de particules, cette approche n’arrive pas à améliorer les solutions trouvées initialement. En même temps, l’ajustement des paramètres de PSO n’évite pas la précocité de convergence. Afin de trouver la cause de ce phénomène, une analyse statistique a été réalisée. L’approche a été lancée 50 fois avec le même ensemble de paramètre de PSO, le Q-Q plot et l’histogramme ([Figure II-4](#)) montre que les solutions trouvées par l’approche ne présentent pas la distribution normale mais plutôt une distribution uniforme, ce qui signifie que la convergence n’est pas formée par l’approche. Ce phénomène est en effet dû à l’intégration de différents niveaux de décision dans la même itération d’évolution des particules, ce qui fait que le mouvement linéaire des particules dans l’espace de recherche engendre une évolution non-linéaire et non-corrélée de l’espace des solutions. Ces résultats nous confirment que la résolution du problème global doit être adaptée à la structure décisionnelle pour contenir des décisions multi-niveaux interdépendantes.

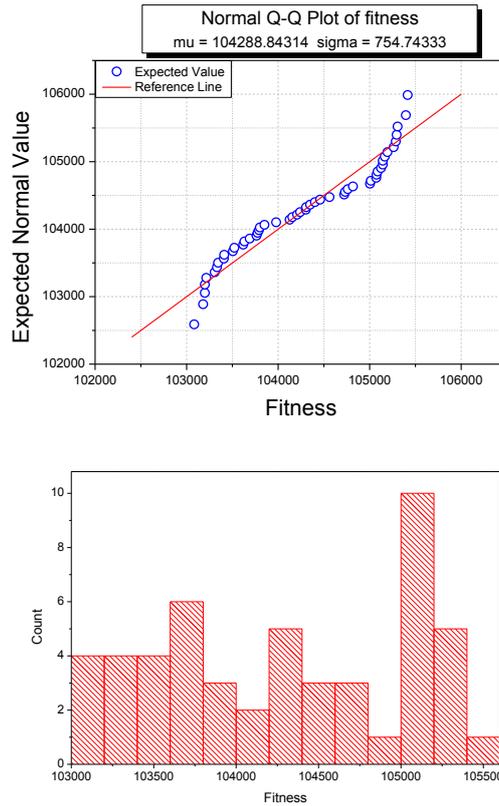


Figure II-4 Q-Q Plot et histogramme des solutions trouvées par l'approche en PSO

II-4. Conclusion

Ce projet a été initié par un ensemble d'établissements de santé qui présente un intérêt commun. La volonté était de créer un réseau qui mutualise l'utilisation d'un système de dispensation individuelle et nominative. L'enjeu de ce projet consiste à concevoir la structure logistique optimale à travers un ensemble de décisions multi-niveaux. Pour cela, initialement, une approche simplifiée traitant indépendamment les sous-problèmes est développée. Comme la décision du niveau stratégique est prise sans prendre en compte sa conséquence sur le niveau opérationnel, le résultat obtenu reste sous-optimal. Ensuite, une approche intégrée a été proposée avec la résolution exacte d'un modèle de programmation linéaire. Cependant la complexité présente dans cette approche limite la qualité de la solution même si la taille du problème reste modeste. Par conséquent, une autre approche intégrée s'appuyant sur une méta-heuristique a été développée. Pourtant, et en raison de l'interdépendance des décisions multi-niveaux, l'évolution de

toutes les dimensions décisionnelles dans la même itération empêche la convergence efficace de l'algorithme.

Ainsi, nous envisageons de développer une approche basée sur une méta-heuristique, qui soit intrinsèquement capable d'intégrer la structure multi-niveaux décisionnels à son processus de résolution. L'objectif est de rendre cette nouvelle approche générique aux problèmes d'optimisation multi-niveaux, et reste performante en termes de qualité de solution et de durée de résolution.

De plus, au regard du besoin d'extension du projet de la Mutualité de la Loire et aussi apporter notre contribution dans la résolution des problèmes multi-niveaux, nous avons tout intérêt à chercher à généraliser cette approche méta-heuristique. Pour cela, le chapitre suivant est consacré à l'introduction de la notion du problème d'optimisation multi-niveaux, en fonction des différents niveaux décisionnels, des différents processus de résolution, et des différentes combinaisons de sous-problèmes.

Chapitre III :

Positionnement du problème d'optimisation multi-niveau

III-1. Différents niveaux décisionnels

À travers le projet de mutualisation du système de la distribution de médicaments, nous avons constaté que le pilotage efficient d'une structure en réseau requière le développement de nouvelles approches plus appropriées à une telle structure où les décisions sont interdépendantes. La structuration en réseau d'un système industriel ou hospitalier rend plus compliqué l'articulation des décisions de production et de distribution. Ce réseau implique de nombreuses interactions au niveau décisionnel et informationnel.

Selon notre approche, le réseau intègre en plusieurs décideurs qui sont, à la fois, partiellement autonomes et en interrelation. Le pilotage d'une telle structure crée une bi-direction dans la hiérarchisation des décisions dans le réseau. Cette caractéristique différencie le réseau d'une organisation hétérarchique, où les décisions sont indépendantes, ou encore d'une structure centralisée où décisions et informations sont regroupées en un unique centre. L'organisation hétérarchique est une forme d'organisation qui est basée sur une structure avec peu ou pas de niveaux intermédiaires de gestion. Cela permet d'avoir moins de niveaux administratifs impliqués dans le processus de prise de décision. Pourtant cette simplification du processus de prise de décision devient difficile dès que le nombre de décideurs augmente. Les contraintes de chaque décideur du réseau doivent être prises en compte tout en maintenant la performance globale, cela signifie que la hiérarchisation au niveau décisionnel est souvent nécessaire afin de distribuer les objectifs aux décideurs et d'agrèger leurs retours. La présence de la prise de décision sur plusieurs niveaux permet d'envisager un contrôle dynamique et coordonné des décisions (Trentesaux, 2002). De ce fait, pour prendre en compte d'interdépendance décisionnelle, le pilotage d'une telle structure demande l'adaptation des approches d'aide à la décision, notamment pour les décisions d'optimisation, qui sont généralement sensibles à la taille et la structure du problème.

De nombreux problèmes ont été largement étudiés à tous les niveaux décisionnels, que ce soit le niveau stratégique, tactique ou opérationnel. Pourtant

ces problèmes d'optimisation sont assez souvent traités de manière isolée. Dans le cas du projet de mutualisation du système de la distribution de médicaments, ce sont les trois niveaux décisionnels qui ont été impliqués dans un problème d'optimisation multi-niveaux soulevant globalement trois problèmes d'optimisation.

Nous détaillons ci-dessous les différents niveaux décisionnels relatifs à la configuration et à gestion des réseaux logistiques.

III-1.1. Niveau stratégique

Dans le cadre des réseaux logistiques, le niveau stratégique correspond à la conception du réseau logistique à travers la détermination de l'emplacement des centres de production et de distribution. Cette conception concerne des décisions d'ordre stratégique car il convient d'intégrer des décisions relatives à l'introduction ou à l'intégration des lignes de production, des décisions liant la structure du réseau de la chaîne logistique afin qu'elle réponde à la demande des clients, et des décisions concernant le rôle de chaque nœud du réseau en termes d'allocation, d'approvisionnement et de stratégie de stockage. Toutes ces décisions stratégiques en matière de réseau logistique se caractérisent généralement par des investissements et des engagements à long terme (Dogan et Goetschalckx, 1999). Elles intègrent généralement un large éventail de règles de gestion souvent couplées à des paramètres et à des contraintes complexes. Vu l'importance stratégique et la complexité du problème, rechercher une solution optimale nécessite d'appréhender tous les éléments plutôt simultanément que séquentiellement.

La localisation, le dimensionnement et le choix technologique sont des décisions typiques au niveau stratégique du réseau logistique.

III-1.1.1. Le problème de localisation

Le travail d'Owen et Daskin (Owen et Daskin, 1998) a présenté une catégorisation des problèmes de localisation.

- Le premier problème abordé est un problème de recouvrement (Set Covering Problem), il consiste à minimiser les coûts d'installation des dépôts en s'assurant de couvrir au mieux l'ensemble des besoins des

clients avec ces centres. Ce problème contient le moins de type de contrainte.

- Le problème de p-médiane, introduit par Hakimi (Hakimi, 1964), propose de positionner les centres afin de minimiser la somme des distances entre les centres et les clients pondérée par les demandes de clients. Il repose sur la considération des trajets en faisant aller-retour entre centres et clients, sous forme de marguerite, afin de prendre en compte les coûts logistiques découlant du choix de localisation des p dépôts à ouvrir. Le problème de p-médiane est NP-difficile (Tamir, 1993). Par rapport au problème de recouvrement, ce dernier envisage le problème de tournée suite à la localisation du dépôt, dans une forme simplifiée.

III-1.1.2. Le problème de dimensionnement

Le problème de dimensionnement consiste à décider la capacité de l'installation pour satisfaire au mieux l'ensemble des clients. Il existe de nombreuses variantes. Le problème peut concerner un ou plusieurs centres, les travaux (Bashyam, 1996; Taaffea et al., 2010) s'intéresse à la conception logistique introduisant un environnement avec des incertitudes sur les demandes de clients. Eppen et al. (Eppen et al., 1989) intègre la gestion des risques dans le modèle de résolution. Compte tenu de l'évolution de la demande, un processus d'extension de capacité est ici caractérisé par une quantité et une date d'acquisition de ces capacités. Le problème d'extension de capacité vise à trouver un ensemble optimal de décisions d'extension permettant à l'entreprise de répondre à la demande sur un horizon de temps prédéfini. L'objectif est de minimiser les coûts associés au processus d'extension. Le travail sur l'extension des capacités de Manne (Manne, 1961) a permis d'examiner le degré optimal de capacité excédentaire devant être intégré dans une usine quand la contrainte économique est associée. Cette analyse comprenait également le cas où des retards sur les demandes insatisfaites étaient autorisés. Une autre référence de Manne (Manne, 1967) introduit le problème d'extension de capacité sur plusieurs centres.

III-1.1.3. Le problème du choix technologique

La décision du dimensionnement indique les tailles des installations à mettre en place sur les sites sélectionnés par les décisions de localisation. Définir la capacité en choisissant parmi un ensemble de technologies alternatives fait aussi partie du niveau de la décision stratégique. Par exemple, Martel (Martel, 2005) propose une représentation générique des infrastructures par la configuration d'aménagement. Une configuration décrit non seulement l'ensemble des technologies alternatives pouvant être sélectionnées mais aussi les capacités des technologies déjà installées.

III-1.2. Niveau tactique

Dans ce niveau décisionnel, il s'agit de concevoir des réseaux de transport, ceci concerne par la suite de la localisation optimale des plateformes de distribution et des hubs logistiques, l'affectation des clients aux plateformes et la création de liaisons inter-plateformes. Aujourd'hui, un enjeu émergent dans ce niveau est celui de la conception d'un réseau commun à plusieurs partenaires désirant mutualiser des moyens de distribution que ce soit les entrepôts (Makaci et al., 2014), ou les véhicules (Mason et al., 2007).

Makaci et al. (Makaci et al., 2014) ont traité le concept de mutualisation des entrepôts comme l'une des formes de collaboration entre les acteurs de la chaîne logistique, les structures hiérarchiques et hétérarchiques sont impliquées dans la collaboration des acteurs.

Mason et al. (Mason et al., 2007) ont proposé une approche multi-dimensionnelle, qui comprend une méthode de construction de modèles pour la gestion des chaînes logistiques, qui exploite la compétitivité et la collaboration, dans un environnement à la fois vertical avec des partenaires de la chaîne logistique et horizontal avec d'autres fournisseurs de services logistiques. Ce travail a relevé l'enjeu de combiner la collaboration verticale et horizontale.

Un autre enjeu important dans le niveau tactique concerne la conception de services de transport plus efficaces et respectueux de l'environnement. Les travaux de Sultan (Sultan, 1993) ont présenté les modèles de programmation linéaire de problème de l'affectation dans un contexte de logistique.

La décision comme l'affectation des clients joue un rôle intermédiaire dans la conception et l'optimisation de réseau logistique, elle peut être considérée comme une adaptation prévisionnelle pour les décisions au niveau opérationnel.

III-1.3. Niveau opérationnel

Les décisions de ce niveau décisionnel sont relatives à gestion au quotidien des opérations logistiques. Du point de vue logistique, cela concerne notamment l'optimisation des transports, et en particulier les problèmes de tournées de véhicules (VRP). Le problème de tournées de véhicules consiste à déterminer les tournées d'une flotte de véhicules afin de visiter une liste de clients, en minimisant le coût de transport. Ce problème est une extension classique du problème du voyageur de commerce (TSP), et fait partie de la classe des problèmes NP-complet. D'autres types de décisions existent dans ce niveau opérationnel. C'est le cas de décisions liées aux approvisionnements, à la production, au stockage ou au couplage de ceux-ci avec le transport.

Les problèmes de tournées de véhicules ont été largement étudiés au sein de ce thème. La littérature y est extrêmement abondante. La première formulation qui fait référence est celle de l'article sur le VRP de Dantzig et Ramser (Dantzig et Ramser, 1959). Un état récent de la littérature peut être trouvé dans l'article de Laporte (Laporte, 2009) et aussi dans celui de Lin et al. (Lin et al., 2014). En termes de variantes, on trouve en générale :

- Le VRP avec contrainte de capacité de véhicule (CVRP). Baldacci et al. (Baldacci et al., 2010) propose une synthèse de la résolution exacte du problème CVRP, leurs formulations mathématiques et différentes relaxations. Alba et Dorronsoro (Alba et Dorronsoro, 2006) présente un algorithme génétique cellulaire (cGA), une méta-heuristique basée sur la population décentralisée pour résoudre le problème CVRP. Le travail de Xiao et al. (Xiao et al., 2012) propose un algorithme en recuit simulé (SA) pour résoudre un problème de CVRP dont l'objectif spécifique est de minimiser la consommation de carburant. Le travail de Chen et al. (Chen et al., 2010) propose une heuristique en descente à voisinage variable (IVND) pour résoudre le problème CVRP.
- Le VRP avec Pickup & Delivery (VRPPD). Parragh et al. (Parragh et al., 2008) présentent une synthèse du problème VRPPD en distinguant

deux classes de problème. Gendreau et al. (Gendreau et al., 2015) proposent trois formulations mathématiques pour un problème de TSP avec Pickup & Delivery et le résolvant par un algorithme en branch-and-cut. Le travail de Masson et al. (Masson et al., 2014) propose un algorithme en branch-and-cut-and-price pour résoudre le problème Pick-Up & Delivery avec fenêtres de temps. Le travail de Nagy et Salhi (Nagy et Salhi, 2005) propose une méthode qui traite Pickup & Delivery de manière intégrée, pour le problème VRPPD avec des dépôts multiples.

- Le VRP stochastique (VRPSD). Gendreau et al. (Gendreau et al., 1996) proposent un état de l'art relatif à ce problème. Dror et al. (Dror et al. 1993) traitent un cas réel du problème VRPSD avec des demandes stochastiques et des contraintes de pannes potentielles du véhicule. Le travail de Rei et al. (Rei et al., 2010) propose une méthode hybride en l'algorithme Monte Carlo et local branching pour résoudre le problème VRPSD avec des demandes stochastiques. Le travail de Mendoza et al. (Mendoza et al., 2010) présente un algorithme hybride qui couple l'algorithme génétique et une procédure de recherche locale pour résoudre un problème VRPSD avec les demandes stochastiques à multiples compartiments.
- VRP avec contrainte de charge. Par exemple, Ladany et Mehrez (Ladany et Mehrez, 1984) proposent une méthode énumérative pour résoudre ce type de problème si celui-ci est de petite taille. Zachariadis et al. (Zachariadis et al., 2012) traitent un problème de VRP avec contrainte de charge en palettes, ce problème est résolu par la méta-heuristique de recherche taboue (TS). Pour prendre en compte cette contrainte de charge, une seconde approche heuristique est utilisée à la suite de la première solution. Le travail de Duhamel et al. (Duhamel et al., 2011) présente une méthode GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) hybridée par un algorithme de recherche locale évolutionnaire pour résoudre un problème VRP avec une charge pondérée à deux dimensions. Carrabs et al. (Carrabs et al., 2007) utilisent une heuristique de recherche à voisinage variable (VNS) pour un problème de TSP avec contrainte de charge LIFO (Last in First Out). Le travail de Tricoire et al. (Tricoire et al., 2011) propose une méthode

hybridant une recherche à voisinage variable et un Branch-and-cut pour un cas réel de distribution de bois.

- Le VRP avec fenêtre de temps (VRPTW). Kallehauge (Kallehauge, 2008) présente une synthèse des méthodes de résolution du problème VRPTW avec des méthodes exactes. Solomon (Solomon, 1987) développe et analyse plusieurs heuristiques dédiées à la résolution du problème VRPTW. Russell (Russell, 1977) présente une heuristique pour résoudre un problème de TSP avec une contrainte spécifique sur l'intervalle de temps. Le travail de Çetinkaya et al. (Çetinkaya et al., 2013) propose une heuristique basée sur un algorithme mimétique (MA) pour résoudre un problème de TSP avec fenêtre de temps. Lai et Cao (Lai et Cao, 2010) proposent un algorithme d'évolution différentielle (DE) pour un problème de VRP avec Pickup & Delivery et fenêtre de temps.
- Il existe de nombreuses combinaisons de ces variantes.

En termes de domaine d'application, on trouve en générale :

- Les problèmes combinant la production et la distribution. Adulyasak et al. (Adulyasak et al., 2015) présentent un état de l'art qui offre une discussion sur différents formulations et algorithmes. Dhaenens-Flipo (Dhaenens-Flipo, 2000) présente une schématisation hiérarchique d'un système de production couplé à son système logistique. Une méthode de branch-and bound est développée pour la résolution. Le travail de Gyulai et al. (Gyulai et al., 2013) traite un problème combiné d'ordonnancement et de logistique, dans un environnement d'atelier de grande taille, avec une méthode de recherche locale basée sur les solutions initiales générées par une heuristique.
- Les problèmes de tournées dans le secteur de la santé. La thèse de Redjem (Redjem, 2013) traite un problème de HAD en forme de VRP avec les contraintes spécifiques liées au domaine de santé, en développant une formulation mathématique et une heuristique énumérative. La thèse de Ngueveu (Ngueveu, 2009) porte sur la résolution de deux problèmes de VRP qui intègrent des contraintes de maîtrise des risques à prendre en compte dans la gestion du transport

de premiers secours. Différentes formulations mathématiques, heuristiques et méta-heuristique sont proposées dans ses travaux. Le travail de Kergosien et al. (Kergosien et al., 2013) traite le cas réel d'un problème de logistique à l'hôpital de Tours, ce problème se caractérise par deux niveaux interconnectés de tournées. Le premier niveau concerne le problème de routage pour une flotte de véhicules desservant plusieurs unités de l'hôpital. Le deuxième concerne le problème de routage entre les bâtiments au sein d'une unité de l'hôpital. ce problème multi-niveaux est résolu par deux méta-heuristiques (un algorithme génétique et une recherche taboue).

- Les problèmes de transport de personnes en milieu urbain. Le travail de Park et Kim (Park et Kim, 2010) présente une synthèse du problème d'organisation des ramassages par bus scolaires (SBRP) qui est équivalent à un VRP avec pickup & delivery et fenêtre de temps. Euchi et Mraïhi (Euchi et Mraïhi, 2012) développent une méthode hybride basée sur l'algorithme de colonies de fourmis et un algorithme de recherche locale pour résoudre un problème de SBRP en Tunisie. Le travail de Song et Kim (Song et Kim, 2013) traite un problème de SBRP en Corée du sud avec un objectif de qualité de service en utilisant une heuristique spécifique. Riera-Ledesma et Salazar-González (Riera-Ledesma et Salazar-González, 2013) proposent une méthode d'hybridation de la génération de colonnes et branch-and-price pour résoudre un problème de MVTTP (Multiple Vehicle Traveling Purchaser Problem) avec contrainte de ressource.

III-2. Articulation entre différents niveaux décisionnels

L'intégration et la coordination des décisions stratégiques et tactiques/opérationnels renforcent la pertinence de la modélisation des réseaux logistiques (Dogan et Goetschalckx, 1999 ; Goetschalckx et Dogan, 2002). Les décisions prises au niveau stratégique conditionnent celles à prendre au niveau tactique et, inversement, la faisabilité de ces dernières valide ou non la pertinence des décisions stratégiques. Cependant, comme l'expression dans la théorie des systèmes « le tout est plus que la somme des parties », un simple assemblage des modèles d'optimisation de différents niveaux décisionnels ne peut pas assurer la cohérence et l'optimalité de solution globale. La modélisation de ces modèles

d'optimisation est non seulement associée au respect de la reproduction du système réel, mais aussi liée à la rationalisation du couplage et de la corrélation entre les modèles qui sont initialement développés indépendamment. Le challenge est celui de la modélisation de la méta-structure des modèles d'optimisation pour englober le problème multi-niveaux à étudier et permettre à l'ensemble des solutions des différents niveaux de converger de façon cohérente vers un objectif plus global.

De notre point de vue, le terme multi-niveaux signifie essentiellement l'existence d'une structure d'intégration des sous-problèmes. Cette structure d'intégration peut être hiérarchique ou séquentielle. La forme de cette structure séquentielle peut provenir directement du processus de prise de décision à travers la modélisation du système réel, on peut le considérer comme un problème multi-niveaux explicite. Cependant, certains problèmes multi-niveaux, comme celui présenté dans le chapitre 2, ne possèdent pas nécessairement d'une telle structure séquentielle. Il est tout à fait possible de fusionner certains ou la totalité des niveaux dans un seul modèle de résolution. Inversement, on peut considérer qu'un problème initialement mono-niveau, qui possède une intra-structure séquentielle entre ses différentes parties, peut être modélisé par un modèle multi-niveaux, comme si ce problème était construit par une séquence de sous-problèmes. Il est, alors, considéré comme un problème multi-niveaux implicite. Sa différence par rapport à un problème multi-niveaux explicite demeure au niveau de l'application. Les problèmes explicites ou implicites, ils sont parfaitement identiques au niveau conceptuel du processus de résolution. En d'autres termes, la structure du modèle de résolution peut être différente de la structure réelle des problèmes multi-niveaux, et ceci est aussi être validé réciproquement. Afin d'explicitier le lien entre le problème réel et sa modélisation, nous proposons une classification de cette association.

III-2.1. Modélisation intégrée

La structure intégrée fusionne les phases de résolution de tous les niveaux dans un seul modèle, l'avantage d'ici c'est que le couplage entre différents niveaux de résolution n'a plus besoin d'être considéré. Un problème d'optimisation multi-niveaux de faible complexité, au niveau du processus décisionnel ou de la taille de l'instance, peut être modélisé et résolu a priori par une méthode exacte (Laporte et al., 1986).

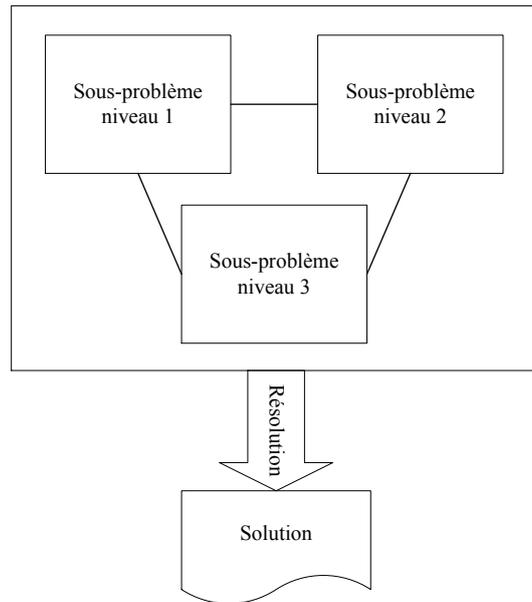


Figure III-1 Modélisation intégrée du problème multi-niveau

La [Figure III-1](#) illustre la modélisation intégrée d'un problème avec une intra-structure multi-niveau. Quelles que soient par les méthodes de résolutions, exactes ou approchées, on modélise un tel problème en intégrant toutes les dimensions décisionnelles dans un seul espace de solution. L'inconvénient de cette approche subsiste en particulier avec le problème d'optimisation multi-niveaux explicite.

La méthode exacte est relativement adaptée pour la résolution de modèles intégrés, mais elle peut difficilement faire face aux problèmes ayant un espace de recherche de croissance exponentielle. Par exemple, un problème TSP avec $k*n$ clients a une complexité de $O((k*n)!)$, si on ajoute un niveau décisionnel de choix de k centres parmi m candidats et un niveau de l'affectation des clients aux centres, la complexité dans le cas de la répartition moyenne des clients aux centres est de $O(m!*(k*n)!/(k!*n!*(m-k)!))$, soit un produit de la complexité de tous les niveaux.

Les méthodes approchées, qu'elles soient heuristiques ou méta-heuristiques, sont moins sensibles au problème de l'espace de recherche mais l'intégration des sous-problèmes multiples peut rendre la conception de l'approche difficile et peut notamment empêcher la convergence de la résolution. L'inter-connectivité des dimensions décisionnelles fait que si ces variables sont traitées comme un seul ensemble, la convergence de solution trouvée sera

perturbée au même titre que si l'interaction entre ces dimensions décisionnelles était ignorée. La non-linéarité du système rend sa modélisation complexe, les éléments contenus dans les différents sous-ensembles et surtout l'interaction de ces sous-ensembles font que le comportement est difficile à anticiper (Devaney, 1987; Waldrop, 1992).

III-2.2. Modélisation parallèle

Il existe aussi la possibilité que plusieurs décisions coexistent parallèlement dans un seul problème global qui peut être considéré comme compliqué s'il était appréhendé dans sa globalité. Ces décisions parallèles ne sont pas corrélées mais la solution du problème global est composée par l'ensemble de leurs solutions qui peuvent être analysées séparément les unes des autres.

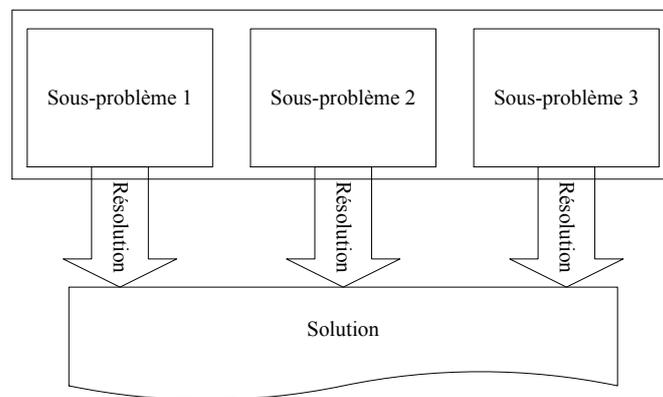


Figure III-2 Modélisation parallèle du problème multi-niveau

La [Figure III-2](#) illustre la modélisation parallèle d'un problème avec une intra-structure multi-sous-problèmes. Il peut être considéré que ces sous-problèmes sont sur un même niveau décisionnel. Par exemple, un problème de localisation couplé avec un choix des technologies est un cas de la structure parallèle, le choix du centre n'a pas de lien direct avec le choix des technologies, pourtant ils agissent également sur la performance globale.

III-2.3. Modélisation hiérarchisée

La modélisation hiérarchisée reproduit le processus décisionnel séquentiel. La [Figure III-3](#) illustre ce processus. Contrairement à la modélisation parallèle, il existe les interrelations entre les sous-problèmes décomposés dans le problème

traité par la modélisation hiérarchisée. Selon le discours de la Méthode de Descartes, la décomposition d'un problème compliqué en portions plus réduite permettrait de simplifier la résolution, ce qui est le cas de la modélisation parallèle. Pourtant pour un problème complexe avec un enchaînement des niveaux décisionnels, la solution du sous-problème « mère » domine. Elle conduit aussi à constituer et à contraindre son sous-problème « enfant » dans un espace de solution peut-être sous-optimal. Cet aspect analytique fait que cette Méthode de Descartes, performante pour résoudre les problèmes compliqués, ne permet pas d'organiser optimalement la résolution d'un problème complexe dans lequel les sous-problèmes sont interdépendants.

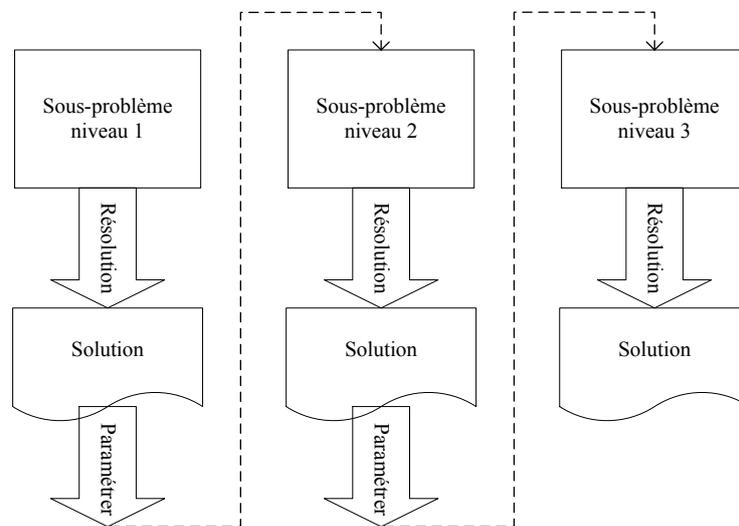


Figure III-3 Modélisation hiérarchisée du problème multi-niveau

La méthode GRAI (Doumeingts, 1984) décrit plus concrètement cette caractéristique de la domination entre les niveaux décisionnels hiérarchisés. En se référant à l'approche systémique du processus décisionnel, il est possible de décrire les décisions pour chaque niveau de la décomposition par un couple temporel d'horizon et de période (*Figure III-4*). Chaque flux de décision cadre les objectifs attendus par la décision du niveau hiérarchique et le choix parmi les actions possibles. Ainsi, le retour d'information renvoie la performance liée à la décision du niveau hiérarchique. À part le cas du système en temps réel, le retour des informations ne peut pas être utilisé pour réajuster immédiatement les décisions prises dans les niveaux hiérarchiques notamment pour le niveau stratégique du système dans lequel l'anticipation de la performance dans

différents horizons est importante. C'est aussi la raison pour lequel la grille GRAI peut permettre de définir les interrelations décisionnelles dans un système complexe.

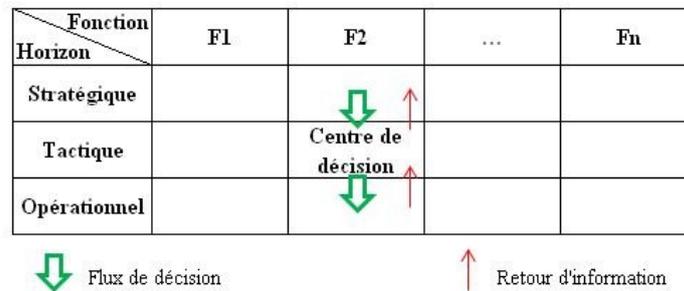


Figure III-4 Grille de la méthode GRAI

L'utilisation de la modélisation hiérarchisée peut être justifiée en fonction du type de problème d'optimisation multi-niveaux :

Pour le problème d'optimisation multi-niveaux explicite, la structure de résolution hiérarchisée fait que chaque niveau décisionnel correspond à une phase de résolution relativement indépendante, un couplage est nécessaire entre deux niveaux voisins. Dans ce cas les sous-problèmes sont hétérogènes.

Pour le problème d'optimisation multi-niveaux implicite, la structure de résolution hiérarchisée doit permettre une décomposition hiérarchique des espaces de recherche pour générer des solutions partitionnées. Deux types de problèmes peuvent être considérés :

- un problème isolé mais qui contient des décisions de type séquentiel. Il peut être modélisé comme une série des sous-problèmes temporellement distincts (Zhang et al., 2012) ;
- un problème isolé mais qui contient des décisions de granularité variée. Il peut être modélisé comme une conception avec les espaces de recherche discrets et homogènes mais avec une granularité qui, correspondant à l'augmentation du détail dans les phases de résolution, va varier (Duvigneau, 2007).

Dans ce cas les sous-problèmes sont homogènes.

III-3. Résolution du problème d'optimisation multi-niveau

Le problème d'optimisation multi-niveaux a déjà été défini dans les travaux de recherche (Candler et Norton, 1977 ; Candler et Townsley, 1982) dans le cadre d'une application spécifique, celui du problème de développement agricole. Dans ce contexte, les décideurs économiques établissent certaines politiques agricoles, pour que les agriculteurs puissent ensuite mettre en œuvre et optimiser en fonction de leurs propres critères. Cette multiplication des acteurs et des décisions peut parfois conduire à des résultats différents que ceux que les décideurs politiques avaient prévus. Partant de ce constat, le niveau supérieur du problème d'optimisation étudie les réactions des agriculteurs afin d'atteindre réellement un effet optimal des politiques agricoles. Il s'agit donc d'un problème d'optimisation à 2 niveaux. Candler et Norton (Candler et Norton, 1977) ont défini un problème générique à plusieurs niveaux décisionnels. Il s'agit d'une généralisation par la programmation mathématique. Elle peut être utilisée pour modéliser la prise de décision dans une grande organisation avec plusieurs niveaux hiérarchiques. Dans ce contexte, le problème d'optimisation globale est implicitement déterminé par une série de problèmes d'optimisation qui doivent être résolus dans un ordre prédéterminé.

Divers problèmes d'optimisation multi-niveaux ont été largement étudiés sans pour autant mentionner le terme « problème d'optimisation multi-niveaux ». cela est dû au fait que ces travaux de recherche sont plutôt concentrés sur un problème d'optimisation multi-niveaux bien spécifique, avec un modèle ou une méthode de résolution dédiée à ce problème. L'utilisation de la modélisation et de la résolution hiérarchisée est structurée à partir, soit du problème étudié (qui est caractérisé explicitement par une structure multi-niveaux, composée des sous-problèmes différents et imbriqués), soit de la décomposition « classique » du problème initial en ignorant volontairement les interactions (afin de diminuer l'espace de solution à traiter). Dans le premier cas, la modélisation d'un problème multi-niveaux complexe en un seul modèle par des méthodes méta-heuristiques ou heuristiques est généralement compliquée et nécessite beaucoup plus de techniques et de temps de modélisation. La formulation mathématique dans ce cas serait mieux au niveau de la modélisation mais peut conduire à des formulations non-linéaires, souvent difficile à résoudre. Pourtant les problèmes étudiés sont NP-difficiles ou NP-difficiles au sens fort si au moins un sous-problème imbriqué est NP-difficile, ce qui fait que les méthodes exactes ou d'autres recherches

énumératives sont inutilisables. Au contraire, la décomposition « classique » permet au problème global d'être modélisé par un ensemble de sous-modèles au lieu d'un seul modèle complexe. Cela permet d'atténuer la complexité de modélisation et de résolution. Dans ce cas, et pour maintenir la cohérence de l'ensemble des modèles et des sous résolutions, il devient indispensable de tenir compte du transfert des paramètres d'entrée / sortie entre les sous-modèles. En outre, pour certains problèmes d'optimisation multi-niveaux, il peut être nécessaire de concevoir un estimateur entre niveaux (Chien, 1992). Cet estimateur est utilisé pour évaluer a priori la borne inférieure du sous-problème à niveau inférieur. Cette conception est liée au sous-problème spécifique étudié, et sa qualité peut influencer la qualité de la résolution. Ce type de problèmes est considéré comme des problèmes d'optimisation multi-niveaux ayant une sous-structure optimale feedback.

III-3.1. Sous-structure optimale directe / feedback

Un problème présente sous-structure optimale si une solution optimale du problème contient des solutions optimales des sous-problèmes. Par exemple le problème du sac à dos possède une sous-structure optimale, c'est-à-dire que l'on peut construire la solution optimale du problème à i variables à partir du problème à $i-1$ variables. Cette propriété permet d'utiliser une méthode de résolution comme la programmation dynamique ou un algorithme glouton (Cormen et al., 2009).

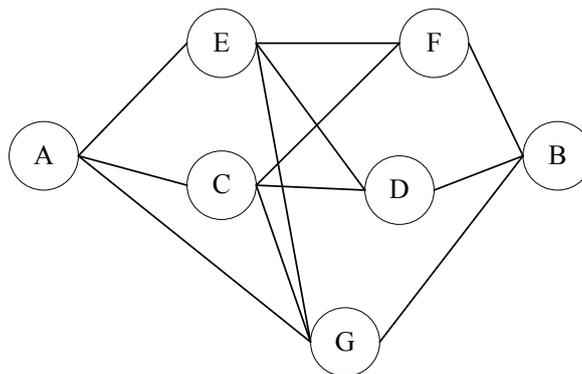


Figure III-5 Le problème avec sous-structure optimale

Un exemple plus concret de sous-structure optimale peut être le problème de recherche du plus court itinéraire entre les deux villes A et B, comme illustre sur la [Figure III-5](#). Si l'itinéraire le plus court traverse C et D, alors l'itinéraire le

plus court de C à B doit aussi passer par D. Autrement dit, le problème pour trouver le plus court itinéraire entre les deux villes C et B est imbriqué dans celui du problème pour A et B, et l'optimum du sous-problème fait partie de l'optimum du problème global. Une formalisation peut être donnée :

Soit $S_{(x)}$ l'ensemble optimal du problème qui donne le performance x et soit p^* la première ville de passage avec une distance $p[i] \leq x$. On a les propriétés suivantes :

- $S_{(x)}$ contient p^* , soit la propriété des choix gloutons optimaux ;
- $S_{(x)} = \{p^*\} \cup S_{(x-p^*)}$, soit la propriété de sous-structure optimale.

Un problème d'optimisation est supposé avoir la propriété de sous-structure optimale si et seulement si la solution optimale de son sous-problème est toujours contenue dans la solution optimale globale. Pourtant cette notion n'a pas tenu compte l'effet « no-after » pour la résolution du problème. L'effet « no-after » assure le transfert de l'optimalité en suivant l'enchaînement de la résolution des sous-problèmes décomposés, dans ce cas, les sous-problèmes restant à résoudre n'ont pas d'effet sur les optimums locaux antérieurement obtenus. Par conséquent, l'adoption de la méthode comme programmation dynamique ou une recherche gloutonne demande que le problème ait non seulement la propriété de sous-structure optimale mais aussi permette l'effet « no-after ».

Afin d'intégrer l'effet « no-after » dans la propriété de sous-structure optimale, nous avons introduit un classement : sous-structure optimale directe et sous-structure optimale feedback. Ce classement nous facilite la distinction de la résolution de deux différents types de problèmes d'optimisation multi-niveau. Dans un environnement avec décisions hiérarchisées (*Figure III-6*), la propriété de sous-structure optimale feedback impose un flux de feedback des décisions hiérarchiques prises qui est à l'inverse du flux de la résolution des sous-problèmes. Dans ce cas, l'optimalité de solutions locales hiérarchiques ne peut pas être déterminé sans la résolution des sous-problèmes dominés. Il n'y a pas ici d'effet « no-after ». Ce qui complique la résolution d'un tel problème.

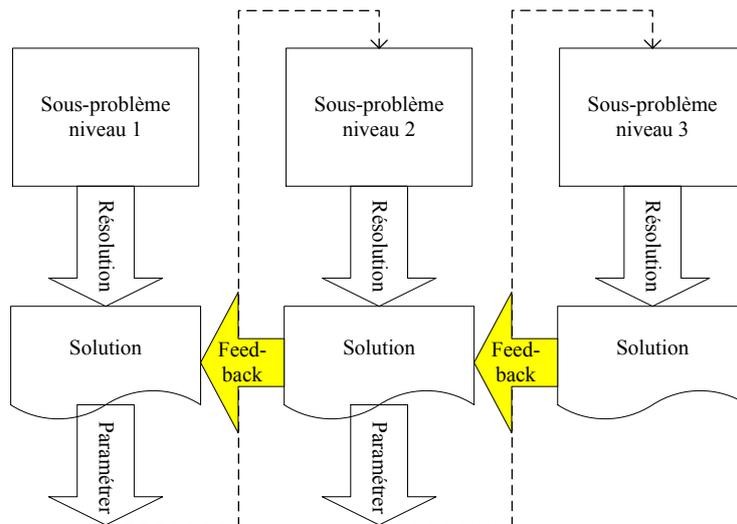


Figure III-6 Sous-structure optimale feedback

Pour faciliter cette formalisation, une définition de ces deux types de problèmes est donnée dans le paragraphe ci-dessous :

Pour un problème d'optimisation multi-niveaux de n niveaux, soit S^i une solution du sous-problème du niveau i . Alors on a deux types de processus de résolution :

Dans le cas d'une sous-structure optimale directe, l'évaluation de la solution du sous-problème à un niveau est toujours connue suivant l'ordre de résolution d'un niveau à l'autre. Une solution du problème global peut être marquée sous forme de l'union de la solution de tous les niveaux $S = S^1 \cup \dots \cup S^i \cup \dots \cup S^n$. L'évaluation et la convergence des solutions des sous-problèmes peuvent suivre le même ordre que la hiérarchisation du problème global. Comme dans le problème de recherche du plus court itinéraire, les sous-problèmes peuvent être résolus sans procéder aux restes de partitionnements du problème global. L'ordre de la résolution du problème est identique au processus de décision. On peut le définir de façon formelle :

- soit la solution du sous-problème du niveau i peut être évaluée indépendamment par sa propre fonction objective : $F^i(S^i)$;

- et la fonction objective globale peut être notée par un assemblage linéaire des fonctions objectives de tous les niveaux :

$$F(S) = \sum_{i=1}^n F^i(S^i).$$

Dans le cas d'une sous-structure optimale feedback, l'évaluation de la solution du sous-problème d'un niveau nécessite toujours la connaissance de toutes les solutions des sous-problèmes des niveaux inférieurs. L'évaluation et la convergence des solutions du sous-problème de chaque niveau ne peuvent être réalisées que si et seulement si tous les niveaux inférieurs sont développés dans le sens inverse de la hiérarchisation du problème global. Selon la caractéristique de la domination entre les niveaux hiérarchisés, la solution du sous-problème au niveau $i+1$ en-dessous du niveau i peut-être notée par $S^{i+1}(S^i)$, indiquant que le sous-problème du niveau $i+1$ est paramétré par la solution de son niveau supérieur S^i , une solution du problème global peut être marquée sous forme récursive $S = S^1 \cup S^2(S^1) \cup \dots \cup S^{i+1}(S^i) \cup \dots \cup S^n(S^{n-1})$, ce qui montre une dépendance entre niveaux imposés par le feedback.

Comme dans le problème de LRP, il est impossible de déterminer la qualité d'une solution de localisation sans savoir comment les affectations et les tournées seront faites. La résolution des sous-problèmes des niveaux inférieurs doit être effectuée avant que les sous-problèmes des niveaux supérieurs ne soient résolus. L'ordre de la résolution de ce type de problème est effectivement inverse à la logique de décision. Pourtant il possède quand même la caractéristique de sous-structure optimale. Sachant que la solution globalement optimale de LRP est composée de la solution optimale des tournées, la solution optimale de l'affectation et la solution optimale de la localisation qui ne sont pas obtenues dans l'ordre de prise de décision, on ne peut connaître a priori la solution optimale du problème inférieur sans connaissance de la solution optimale du problème supérieur. On peut le définir de façon formelle. Mais comme il n'existe pas une fonction objective propre pour le sous-problème d'un niveau donné, la solution du sous-problème du niveau i ne peut qu'être évaluée par la fonction objective globale sous forme récursive telle que $F(S) = F(S^1, S^2(S^1) \dots, S^i(S^{i-1}), \dots, S^n(S^{n-1}))$. Alors, la présence de la solution de tous les niveaux est une condition nécessaire et suffisante pour l'évaluation d'une solution du sous-problème de n'importe quel niveau.

Nous distinguons, ici, la différence entre une sous-structure optimale directe et une sous-structure optimale directe feedback. La présence de sous-structures optimales feedback dans un problème d'optimisation multi-niveaux est une caractéristique sur laquelle l'approche proposée dans ce travail de thèse est applicable. Comme c'est aussi le cas pour le problème de mutualisation de ressources vu au chapitre 2. La méthode proposée cherche à fournir un processus de résolution qui s'adapte facilement à la particularité du problème d'optimisation multi-niveaux avec sous structure optimale et apporte de la généralité à la résolution de ce type de problème. Seuls les problèmes possédant cette caractéristique sont discutés dans la suite de ce mémoire.

III-3.2. Sous-problème homogène / hétérogène

Selon la similitude ou la différence des sous-problèmes hiérarchisés, le problème d'optimisation multi-niveaux peut être décomposé en sous-problèmes homogènes / hétérogènes. Nous pouvons distinguer donc deux types de problèmes. Un problème d'optimisation multi-niveaux est un problème multi-niveaux implicite quand tous ces sous-problèmes sont homogènes. Un problème d'optimisation multi-niveaux est un problème multi-niveaux explicite quand tous ces sous-problèmes sont hétérogènes (§III-3.2.2).

Cette caractéristique distingue le problème d'optimisation multi-niveaux du point de vue de l'application. Le problème d'optimisation possédant des sous-problèmes homogènes peut être décomposé pour segmenter l'espace de solution, les décisions prises à chaque niveau sont homogènes mais également fortement corrélées. D'ailleurs, certains problèmes de décision continue peuvent être traduits en un problème d'optimisation multi-niveaux homogène en décomposant l'espace de recherche, afin de réduire la complexité de résolution.

Quant au problème d'optimisation possédant des sous-problèmes hétérogènes, leur décomposition est souvent due à la modélisation d'un problème complexe. Le problème global contient explicitement différentes décisions interconnectées.

Nous avons sélectionné deux problèmes concrets bien connus de la littérature, le problème ordonnancement de flow shop hybride (HFS) et le problème de localisation-routage (LRP). Il représente chacun un type de

problèmes, homogène ou hétérogène. Ils sont utilisés comme référence pour illustrer les approches de résolution présentées dans les sections suivantes.

III-3.2.1. Sous-problème homogène, le problème d'ordonnancement Flow-Shop hybride

Un problème d'optimisation multi-niveaux possédant des sous-problèmes homogènes peut être caractérisé ainsi :

- Des étapes de prise de décisions séquentielles mais similaires qui ont un contrôle exclusif sur un ensemble de variables. Ces variables sont reliées par un système commun d'évaluation. La résolution suit un processus étape par étape dans un ordre précis, en s'assurant toujours que l'étape suivante ait les solutions faisables.
- L'agrégation de toutes les étapes consiste à minimiser / maximiser le système d'évaluation qui implique toutes les variables de décision. L'espace de solutions, les contraintes au sein d'une étape, ainsi que les variables concernées, sont homogènes avec celles des autres étapes.

III-3.2.1.1. Problème d'ordonnancement de flow shop hybride

Parmi les problèmes de ce type, le problème d'ordonnancement de flow shop a été largement étudié et fait partie d'un problème typique des problèmes d'ordonnancement. Le problème d'ordonnancement de flow shop est une classe de problème d'ordonnancement d'un atelier dans lequel le contrôle du flux permet le séquençage approprié pour n tâches, traitées sur un ensemble de m machines sous contrainte du respect de l'ordre de traitement prédéfinie (en générale séquentiel 1,2,...,m). L'autre type de contrainte est relatif à la limite de ressources, soit une machine ne peut traiter qu'une tâche à la fois. En général, on cherche des solutions optimisant des critères classiques des problèmes d'ordonnancement tels, le makespan de la durée de traitement $\text{Max}(c_i)$, la date de fin de la dernière tâche sur la machine m , ou la somme des durées de traitement des tâches $\sum_{i=1}^n c_i$. L'ensemble de ces critères vise à minimiser les inactivités des machines. Le problème d'ordonnancement de flow shop hybride est une variante de ce problème de Flow-Shop, dans laquelle, on multiplie le nombre de machines pour certains étages. Il faut noter que, au-delà de deux étages, le flow-shop hybride est un problème NP-difficile au sens fort (Hoogeveen et al., 1996).

Portmann et al. (Portmann et al., 1998) ont fourni un algorithme hybride combinant Branch-and-Bound et l'algorithme génétique (GA) pour résoudre la planification préventive dans un flow shop en deux étages. Le travail de Riane et al. (Riane et al., 1998) portait sur un problème d'ordonnancement hybride flow shop à trois étages et a proposé deux approches heuristiques différentes : une heuristique basée sur la programmation dynamique (DPH) et une autre heuristique basée sur un Branch-and-Bound (BaBH). Negenman (Negenman, 2001) a proposé une méthode de recherche locale basée sur des recherches de profondeurs variables et un recuit simulé pour résoudre le problème de flow shop hybride. Gupta et Tunc (Gupta et Tunc, 1991) ont développé deux heuristiques bornés polynomialement afin de trouver une solution acceptable de minimisation du makespan. Cet algorithme peut résoudre seulement un problème spécifique à deux étages, la première étape a une seule machine et le second étage possède plusieurs machines identiques. Plus récemment, ils ont présenté quatre heuristiques de minimisation du makespan pour un problème avec temps changement de série séparable (Gupta et Tunc, 1994). Dans le travail de Carlier et Néron (Carlier et Néron, 2000), trois algorithmes heuristiques ont été présentés en comparant les résultats avec un benchmark de référence. Dans le travail de Costa et al. (Costa et al., 2002), cinq heuristiques ont été testées pour leurs performances. Cette recherche a révélé l'universalité de l'utilisation des approches très individualisées à ces problèmes. Le travail de Wang et Lui (Wang et Lui, 2013) a présenté une méthode heuristique basée sur Branch-and-Bound afin de résoudre un problème d'ordonnancement en deux étages avec des machines dédiées, et les résultats sont comparés avec les algorithmes de recuit simulé (SA) et une recherche taboue (TS). Siqueira et al. (Siqueira et al., 2013) a proposé un algorithme basé sur des stratégies d'évolution pour résoudre le problème de Flowline hybride et flexible. Dans ce travail, une construction heuristique, une recherche gloutonne itérative, une insertion d'amélioration itérative et une méthode de recherche locale sont assemblées pour affiner progressivement la solution. Des algorithmes méta-heuristiques ont été récemment proposés pour ce type de problème, une fois décomposé en sous-problèmes. Moslehi et Khorasani (Moslehi et Khorasani, 2013) ont proposé un algorithme de recherche hybride à voisinage variable (HVNS) avec un recuit simulé pour résoudre le problème d'ordonnancement de flowshop avec permutation de tampon limitée. Cet algorithme a montré une efficacité supérieure par rapport à d'autres algorithmes de la littérature. Zhang et al. (Zhang et al., 2012) ont introduit un algorithme d'optimisation par essaim de

particules (PSO) en deux étapes pour un problème d'ordonnancement de job shop en deux étapes. Dans la première étape de la PSO, un estimateur de performance a été utilisé pour évaluer rapidement les solutions, et une procédure de recherche locale a été intégrée pour accélérer la convergence des régions prometteuses dans l'espace de recherche. Le processus de recherche continue dans la seconde étape, mais avec une politique d'évaluation de la solution plus précise basée sur la simulation de Monte Carlo.

III-3.2.1.2. Autre cas de sous-problèmes homogènes

Duvigneau (Duvigneau, 2007) a utilisé un algorithme PSO superposé pour résoudre un problème d'optimisation de conception aérodynamique progressivement affinée. Ce travail présente une structure de PSO à plusieurs niveaux à la résolution séquentielle et unidirectionnelle avec un mécanisme de raffinement en granularité progressive. Afin de réduire l'espace de recherche et le coût de calcul, l'auteur a suggéré de résoudre le problème en utilisant une méthode de polissage entre niveaux. Chaque niveau de décision a été évalué de manière indépendante sans retour. Il s'agit d'un problème d'optimisation multi-niveaux homogène avec sous-structure optimale directe. Malgré une ressemblance à notre approche proposée dans le chapitre suivant, leur méthode ne s'adapte pas à un problème d'optimisation multi-niveaux avec sous-structure optimale feedback.

III-3.2.2. Sous-problème hétérogène

Un problème d'optimisation multi-niveaux possédant les sous-problèmes hétérogènes peut être caractérisé ainsi :

- étapes de prise de décisions séquentielles et dissemblables qui ont un contrôle exclusif sur un ensemble de variables. Ces variables sont reliées par un système d'évaluation commun. La résolution suit un processus étape par étape dans un ordre précis, en s'assurant toujours que l'étape suivante ait les solutions faisables.
- L'agrégation de toutes les étapes consiste à minimiser / maximiser le système d'évaluation qui implique toutes les variables de décision. L'espace de solutions, toutes les contraintes au sein d'une étape, ainsi que les variables concernées, peuvent être hétérogènes à ceux des autres étapes.

III-3.2.1.3. Problème de localisation-routage

Le problème de localisation-routage (LRP) a été largement étudié et fait partie d'un problème typique de cette catégorie. C'est aussi le cas du problème de mutualisation de ressources présenté dans le chapitre 2. Ce problème de la logistique de transport nécessite des décisions prises à deux ou trois niveaux : le choix de l'emplacement des installations (niveau stratégique) et l'affectation des clients aux centres et l'itinéraire des véhicules (niveau tactique et opérationnel). Bien que ces niveaux soient fondamentalement interdépendants, ils peuvent être traités séparément. Mais il a été prouvé que cela conduit à des solutions sous-optimales (Salhi et Rand, 1989). Toutefois, plusieurs travaux de recherche (Arenas et al., 2011 ; Prins et al., 2007) ont montré que la prise en compte de retour (feedback) du problème de routage en aval pour résoudre le problème de localisation en amont porte les gains significatifs sur la qualité de la solution. Nagy et Salhi (Nagy et Salhi, 2007) ont réalisé un état de l'art des problèmes LRP et ont proposé une classification des heuristiques en deux catégories : l'approche itérative et l'approche séquentielle.

Pour l'approche séquentielle, la localisation du site est choisie dans la première phase et le problème de routage est résolu par la suite, avec en général un estimateur pour donner une évaluation a priori de la solution du routage en aval, ce qui complique la construction de l'approche. Srivastava (Srivastava, 1993) a proposé une approche qui peut être considérée comme approche séquentielle. Le niveau de localisation est résolu d'abord en utilisant un modèle de location-allocation problème (LAP) comme la méthode p-médian (Rolland et al., 1997). Ensuite, le problème de routage est résolu, une méthode itérative traite les sous-problèmes séparément en utilisant des approches heuristiques hybrides. Prins et al. (Prins et al., 2007) ont proposés d'organiser les clients en groupes, puis de les affecter aux centres. Leur modèle a été résolu par une relaxation lagrangienne avec les contraintes d'affectation. La résolution du problème de tournées de véhicules de multi-dépôts a été améliorée en utilisant une heuristique de recherche taboue granulaire (GTS). Wu et al. (Wu et al., 2002) ont présenté une approche de recherche taboue combiné (TS) avec l'approche de décomposition de recuit simulé (SA) pour résoudre le problème LRP avec les multiples types de flottes. Afin de traiter un problème LRP avec contrainte de limite de durée pour les

tournées, Lin et al. (Lin et al., 2002) ont développé un ensemble d'approches en combinant une méta-heuristique avec seuil d'acceptation (TA), un recuit simulé et différentes formes d'interactions entre ces deux méta-heuristiques. Escoba et al. (Escoba et al., 2013) ont présenté un algorithme hybride à deux étapes pour résoudre le problème LRP avec contraintes de capacité. Leur algorithme exploite, en deuxième étape, une recherche taboue granulaire hybride (HSGT) pour améliorer les solutions de la première étape liée à la conception. Une procédure de perturbation aléatoire est intégrée pour éviter de se retrouver bloqué dans un optimum local. Récemment, Ting et Chen (Ting et Chen, 2013) ont appliqué un algorithme d'optimisation par colonies de fourmis (ACO) dans une structure hiérarchique afin d'optimiser les différents sous-problèmes dans une structuration à trois niveaux : le choix de l'emplacement, l'affectation des clients, et la détermination des tournées des véhicules.

III-3.2.1.4. Problèmes multi-niveaux dans le secteur de la santé

Nous pouvons trouver aussi quelques travaux d'optimisation multi-niveaux avec des applications dans le secteur de la santé. Le travail de Testi et Tànfani (Testi et Tànfani, 2009) a traité en même temps un problème de planification tactique du bloc opératoire et un problème d'ordonnancement des opérations en combinant ainsi deux décisions de niveau tactique et opérationnel, par un modèle intégré de programmation linéaire.

Le travail de Ma et Demeulemeester (Ma et Demeulemeester, 2013) a présenté une approche couplée d'un problème multi-niveaux associant une phase de planification à long terme sur le dimensionnement des capacités de chaque unité et une phase de décision à moyen terme sur l'allocation de ces ressources. Ces deux niveaux décisionnels sont résolus séquentiellement par des méthodes exactes avec pour chacune leur propre objectif. Les décisions prises sont ensuite évaluées par un modèle de simulation à événements discrets en introduisant de la variabilité, le résultat de l'évaluation est considéré comme un indicateur de performance pour réajuster les décisions prises. Ce qu'on peut remarquer c'est que leur approche n'est pas générique ni dans l'instanciation automatique des paramètres des sous-problèmes ni dans la procédure de feedback.

Testi et al. (Testi et al., 2007) ont développés une approche hiérarchique à 3 phases pour la planification hebdomadaire des blocs opératoires. La première

phase traite un problème d'affectation hebdomadaire des actes pour chaque bloc, la deuxième phase définit l'ordonnancement des actes. La dernière phase consiste en un modèle de simulation afin d'analyser les séquences d'activités chirurgicales. Cela permet d'améliorer les solutions obtenues. Leur approche consiste également en une structuration hiérarchisée des sous-problèmes mais elle ne gère pas non plus le feedback issue de l'évaluation globale.

III-3.2.1.5. Autre cas de sous-problèmes hétérogènes

Annaluru et al. (Annaluru et al., 2004) ont présenté un algorithme d'optimisation à deux niveaux utilisant une méta-heuristique de type colonie de fourmis, pour l'organisation des capacités d'un système de distribution. La décomposition du problème est appliquée ici en suivant la logique de décision. Ce travail a permis de proposer une méta-heuristique superposée apte à s'adapter à ce problème d'optimisation multi-niveaux hétérogène. Dans le même contexte, la recherche de Legillon et al. (Legillon et al., 2012) a généralisé le problème d'optimisation à deux niveaux avec un schéma bi-niveau co-évolutif, basé sur un algorithme évolutionnaire. Bien qu'il y ait une similitude avec l'approche que nous proposons au chapitre suivant, les auteurs ont utilisé ici un processus de résolution unidirectionnelle entre deux niveaux. En effet, le feed-back du niveau inférieur n'est pas nécessaire pour un problème d'optimisation de deux niveaux avec sous-structure directe. En outre, dans notre approche, une seule fonction objective commune impliquant les décisions de tous les niveaux est utilisée. Cela n'est pas le cas dans les autres travaux de recherche.

III-4. Conclusion

En prenant le cas du problème apporté par le projet de mutualisation de ressources, une décomposition du problème logistique a été faite, les sous-problèmes des différents niveaux décisionnels ont été discutés indépendamment. Ensuite, nous avons trois modes d'articulation entre les différents niveaux décisionnels en fonction de leur interrelation. Pour la structure hiérarchisée, une autre catégorie plus approfondie a été proposée. Elle s'appuie sur la présence du flux inverse du retour de la performance. Nous avons proposé une définition formelle de sous-structure optimale feedback pour décrire cette classe particulière. Enfin, une catégorie relative au point de vue de l'application a été proposée selon la similitude des sous-problèmes hiérarchisés. Le cas du problème

d'ordonnancement de flow shop hybride et celui du problème de localisation-routage ont été évoqués dans l'objectif de comparaison avec notre proposition de la méthode et ses applications aux chapitres suivants.

La décomposition du problème est l'approche généralement appliquée pour réduire la complexité de résolution. En cas d'un problème multi-niveaux ayant la sous-structure optimale feedback, et étant donné que le sous-problème de niveau supérieur doit anticiper les résultats du sous-problème de niveau inférieur, une estimation pour les sous-problèmes dominés est généralement nécessaire si le problème est décomposé. L'existence de l'estimation entre niveaux peut conduire à une augmentation de complexité de la modélisation et une réduction de la généralité des applications. Par conséquent, une approche plus générique dédiée au problème d'optimisation multi-niveaux ayant la sous-structure optimale feedback est proposée dans le chapitre suivant. Il ne s'agit pas simplement d'une décomposition mais aussi d'une procédure récursive qui respecte le processus décisionnel particulier du problème complexe avec la sous-structure optimale feedback. Basé sur une méta-heuristique (PSO), un nouveau mécanisme d'échange d'informations inter-niveaux est appliqué en assurant la convergence et la cohérence des multiples espaces de recherche interdépendants.

Chapitre IV :

Optimisation par la méta-heuristique d'essaims particuliers multi-niveaux

IV-1. Introduction

Ce chapitre présente la méthode que nous proposons pour la résolution générique des problèmes d'optimisation multi-niveaux. Ceux-ci sont caractérisés par une structure hiérarchisée et une sous-structure optimale feedback. Outre cette considération de généricité, la méthode proposée constitue un cadre de résolution dans lequel une méta-heuristique est utilisée comme primitive pour résoudre le sous-problème à chaque niveau. Ce cadre appelle une procédure récursive qui gère les interactions de la résolution entre différents niveaux du problème hiérarchisé.

Dans ce chapitre, la méthode d'optimisation par essaims particuliers multi-niveaux (en anglais : Multi-Level Particle Swarm Optimization, en abrégé : MLPSO) est introduite. Trois modules d'amélioration de la performance sont aussi proposés. Ces modules participent à l'accélération de la convergence de la résolution. Un historique du développement technique est ensuite présenté afin d'apporter une vision chronologique sur l'évolution des développements des solveurs basés sur cette MLPSO.

IV-2. Le choix de la méta-heuristique primitive

La volonté d'intégrer une méta-heuristique dans un cadre de résolution est en adéquation avec les caractéristiques des problèmes d'optimisation multi-niveaux. En ignorant les sous-problèmes décomposés, l'articulation hiérarchisée entre niveaux reste, en effet, générique malgré la diversité du problème. Cela incite au développement d'un cadre de résolution aussi générique que possible, pour structurer la résolution des sous-problèmes. Comme, un algorithme de type méta-heuristique traite respectivement la résolution des sous-problèmes décomposés, Cette méthode permet une connexion directe entre l'approche de résolution et la structure générale du problème multi-niveau. En conséquence, le choix de méta-heuristique primitive doit tenir compte de la correspondance avec

le cadre de résolution. Ainsi le choix de cette primitive devra répondre aux exigences suivantes :

- Basée sur une population de solutions. Comme il existe la relation de domination entre les niveaux hiérarchisés, la correspondance entre la solution du niveau supérieur et inférieur est généralement $1 \rightarrow n$. C'est-à-dire qu'une solution du niveau supérieur aura besoin d'associer plusieurs solutions du niveau inférieur, afin de former une représentation arborescente des branches de différentes solutions possibles en fonction des décisions prises à chaque étape. Une méta-heuristique basée sur population peut produire cette distribution arborescente des solutions par régulation des populations entre les différents niveaux.
- Héritage et encapsulation. Une fois réalisée la distribution arborescente des solutions par les populations des différents niveaux, il faut créer les correspondances entre niveaux. La structure de multi-niveaux et la propriété de sous-structure optimale feedback nécessite que les populations du niveau supérieur héritent de la valeur de performance agrégée par les populations du niveau inférieur.
- Effet de mémoire. En tenant compte des explorations importantes faites par les solutions développées aux niveaux inférieurs, il est important que ces expériences d'exploitation soient, en partie, mémorisées par la population du niveau supérieur.

La méta-heuristique d'optimisation par essaims particulaires (PSO) est très proche que ces conditions requises. La PSO est un algorithme basé sur population, l'existence de *lbest* et *gbest* de la PSO favorise l'héritage entre niveaux et la transmission de ces informations entre les populations encapsulés inter-niveaux, en plus, la recherche de solutions en imitant le mouvement des particules dans l'espace s'adapte parfaitement pour une espace de recherche linéaire. Ses caractéristiques sont donc nécessaires et faciliteront la construction de la méthode la MLPSO.

IV-3. Nouvelle variante d'une PSO dans un cadre multi-niveaux (MLPSO original)

Le problème d'optimisation global peut être décomposé en sous-problèmes qui sont positionnés à différents niveaux décisionnels. L'utilisation de la stratégie multi-niveaux pour un problème de décision se fonde sur trois principes :

- Le chemin d'optimisation est subdivisé en plusieurs étapes d'optimisation qui sont respectivement établies dans des espaces de recherche correspondants ;
- le résultat partiel recueilli sur un niveau donné est transféré dans l'étape suivante sous forme de paramètres initiaux ;
- l'évaluation est effectuée uniquement au niveau le plus bas, et les valeurs de performance sont renvoyées dans les niveaux supérieurs.

Cela caractérise un processus de transmission, le mécanisme de PSO forme une dynamique de convergence à l'espace de recherche d'un sous-problème, et MLPSO offre la possibilité de transmettre cette dynamique de convergence aux autres espaces de recherche liés, tout en maintenant la cohérence de la solution globale. Par conséquent, cette superstructure de PSO est, en effet, formellement compatible avec la structure multi-niveaux du problème d'optimisation. Comme mentionné auparavant, le principe de la décomposition du problème d'optimisation implique que, le niveau supérieur domine le niveau inférieur. Les solutions obtenues du niveau supérieur seront transformées en tant que paramètres pour les sous-problèmes du niveau inférieur. Cela signifie que, cette propagation "paramètres-solutions-paramètres" conduit à générer une structure arborescence dans la MLPSO.

La MLPSO définit une fonction objective unique pour tous les sous-problèmes à différents niveaux. À chaque niveau, un essaim de particules représente un ensemble de solutions candidates pour le sous-problème spécifique. Chaque particule de ce niveau générera un essaim de particules pour son niveau inférieur afin de résoudre un sous-problème différemment paramétré. Il peut donc y avoir des essaims parallèles au même niveau qui sont générés par différentes particules correspondant à leur niveau supérieur. Ces différents essaims se réfèrent à un même sous-problème, mais ils sont mutuellement indépendants.

Cette caractéristique permet d'exploiter le calcul parallèle et distribué comme nous l'illustrerons dans la section suivante.

Sur un même niveau, les particules sont homogènes. Elles sont hétérogènes sur deux niveaux différents. Cela provient du fait que la structure des sous-problèmes est également homogène dans un même niveau et hétérogène entre deux niveaux différents. Comme illustrée sur la [Figure IV-1](#), une relation « parent-enfant » existe entre les différents niveaux. Pour les particules dans l'espace de recherche du niveau inférieur, leurs paramètres du problème sont restreints par leur niveau supérieur. Par conséquent, les espaces de recherche parallèles sont mutuellement indépendants, même si elles résolvent le même problème. Ainsi, une solution complète du problème d'optimisation multi-niveaux est constituée par un ensemble de particules hétérogènes de différents niveaux. Ces particules sont liées par des relations « parent-enfant ». Les [Figure IV-1\(a\)](#) et [Figure IV-1\(b\)](#) montrent qu'une solution complète se compose ici de trois particules des niveaux différents. La [Figure IV-1\(c\)](#) donne un arbre des particules hétérogènes sur la même relation « parent-enfant », illustrant l'interdépendance des différents sous-problèmes.

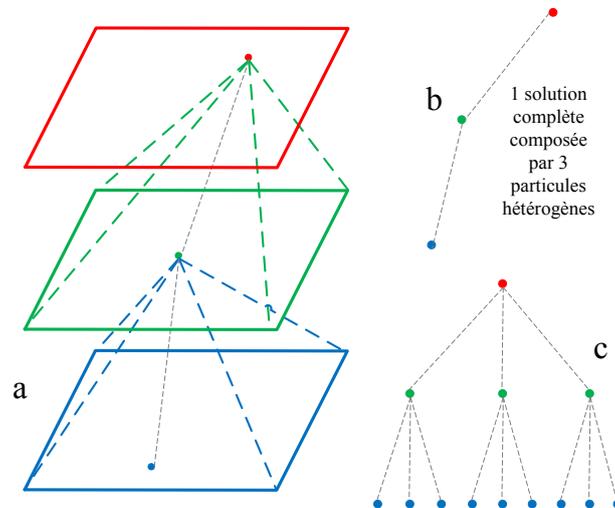


Figure IV-1 Relation parent-enfant de particules hétérogènes

Selon les principes de la PSO originale, chaque solution est caractérisée par une valeur de performance (i.e. valeur de fitness). La convergence de l'algorithme est garantie par le fait que les mouvements des particules sont toujours guidés par *pbest* et *gbest*. Pour la MLPSO, la structure d'arborescence est

générée dynamiquement à partir du niveau supérieur vers le niveau inférieur. Après chaque mouvement d'une particule au plus haut niveau, de nouveaux essaims sont générés de manière récursive jusqu'à ce que le niveau le plus bas soit instancié. Ainsi, une solution complète (composée de particules hétérogènes provenant de différents niveaux) ne peut être évaluée qu'une fois le niveau le plus bas atteint. La valeur de performance pour les particules situées sur les niveaux intermédiaires et supérieurs ne se calcule pas directement, mais sont hérités de celui de la meilleure particule au niveau inférieur. Suivant ce mécanisme, la valeur de performance sera transférée du niveau inférieur au niveau supérieur.

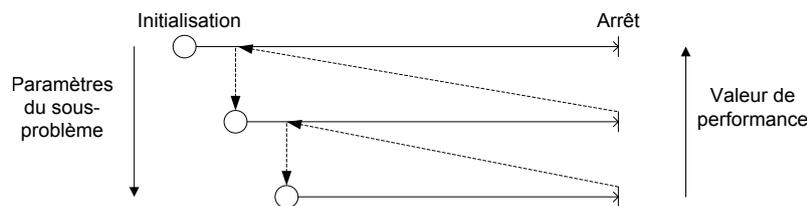


Figure IV-2 Propagation des paramètres et de la valeur de la performance

La [Figure IV-2](#) montre les mécanismes de la propagation descendante et ascendante du MLPSO:

- le mécanisme de flux descendant consiste à générer la hiérarchie des sous-problèmes et à propager des paramètres du niveau supérieur au niveau inférieur;
- le mécanisme de flux ascendant consiste à évaluer la valeur de performance à travers un processus de feedback du niveau inférieur au niveau supérieur.

Une procédure récursive est développée pour gérer ce flux de données bidirectionnel des paramètres et des valeurs de performance à travers les niveaux hiérarchiques. Le logigramme ci-dessous illustre ce processus avec plus de détails.

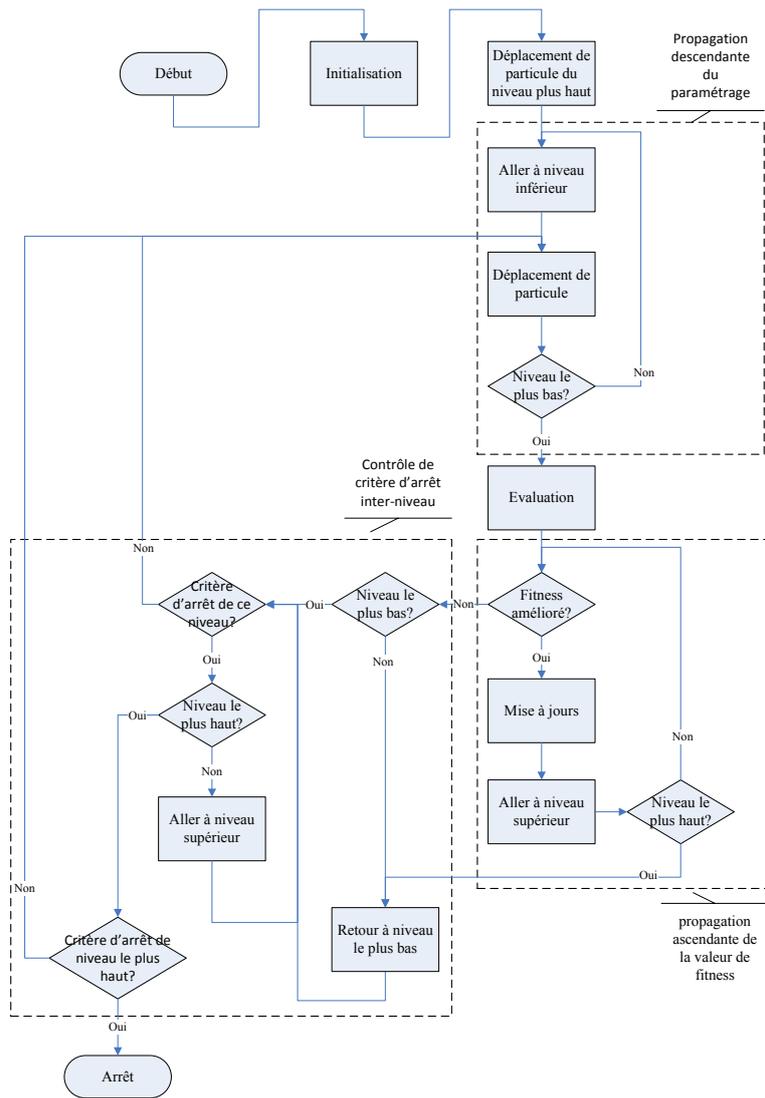


Figure IV-3 Logigramme de fonctionnement de la MLPSO

Une illustration d'étape par étape d'une MLPSO de 3 niveaux (*Figure IV-3*) et un pseudocode de la macro fonction montre un exemple d'une MLPSO plus explicative. Un second pseudocode avec la fonction récursive pour le cas général (n-niveaux) peuvent être trouvé ci-dessous.

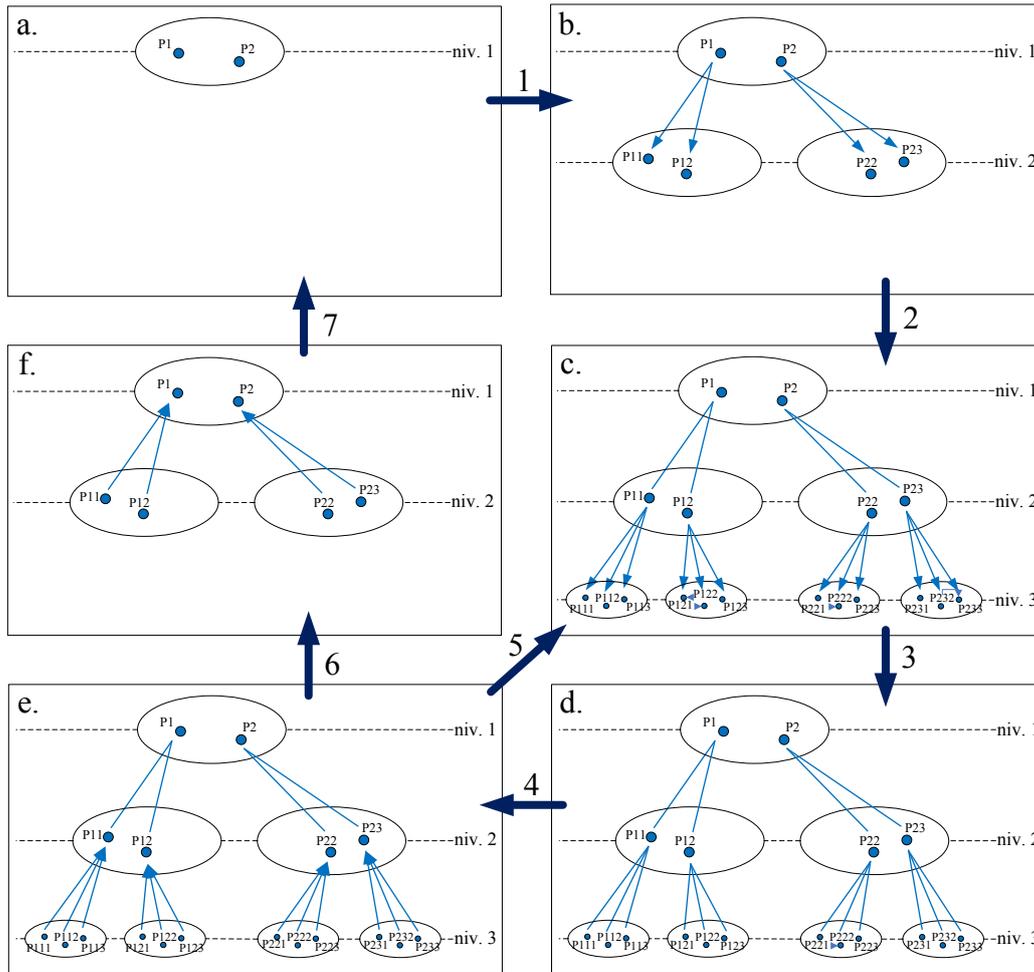


Figure IV-4 Illustration d'étape par étape d'une MLPSO à 3 niveaux

```

*****
Macro pseudocode itératif pour 3-niveaux MLPSO
*****
1 Initialize Swarm_lev1
2 while generation_lev1 < generation_lev1_max do
3   for each particle do
4     Particle_lev1 move
5     Initialize Swarm_lev2
6     while generation_lev2 < generation_lev2_max do
7       for each particle do
8         Particle_lev2 move
9         Initialize Swarm_lev3
10        while generation_lev3 < generation_lev3_max do

```

```

11         for each particle do
12             Particle_lev3 move
13             Evaluation
14             Best update
15         end for
16         generation_lev3 ++
17     end while
18     fitness(particle_lev2) ← gbest(swarm_lev3)
19     Best update
20     Dispose Swarm_lev3
21 end for
22 generation_lev2 ++
23 end while
24 fitness(particle_lev1) ← gbest(swarm_lev2)
25 Best update
26 Dispose Swarm_lev2
27 end for
28 generation_lev1 ++
29 end while

```

```

*****
Macro pseudocode récursif pour  $n$ -niveaux MLPSO
*****
1 MLPSO()
2 Initialize Swarm_lev( $n$ )
3 while generation_lev( $n$ ) < generation_lev( $n$ )_max do
4     for each particle do
5         Particle move
6          $n$  ++
7         while  $n$  ≤ level_max do
8             MLPSO()
9         end while
10        if  $n$  = level_max then
11            Evaluation
12        end if
13        Best update
14    end for
15    generation_lev( $n$ ) ++
16 end while
17 if  $n$  > 1 then
18      $n$  =  $n$ -1
19     fitness(particle_lev( $n$ )) ← gbest(swarm_lev( $n$ +1))
20     Dispose Swarm_lev( $n$ +1)
21 end if

```

Pour un problème d'optimisation multi-niveaux donné, la MLPSO commence par initialiser les particules du plus haut niveau (*Figure IV-4(a)*). En raison de l'absence, à cet instant, de solutions aux sous-problèmes des niveaux inférieurs, les valeurs de performance ne peuvent pas être évaluées comme dans la PSO originale. Par conséquent, la MLPSO devra générer les essaims parallèles du niveau inférieur en fonction des coordonnées de chaque particule du plus haut niveau (solution de sous-problème du niveau actuel). L'algorithme procède ensuite à la initialisation de nouvelles particules au niveau inférieur, et la génération des espaces de recherche du niveau inférieur de ces particules (*Figure IV-4(b)*). Cette procédure récursive est effectuée jusqu'à ce que les particules du niveau le plus bas soient initialisées et évaluées (*Figure IV-4(c)* avec flèche 2). Chaque particule du niveau le plus bas optimise la fonction objective qui respecte les positionnements des particules « mères » (sur la même relation « parent-enfant », si on le voit de bas en haut, ils ont une correspondance 1-1). Elle garde ce résultat comme étant sa propre valeur de performance. Ensuite, ces espaces de recherche du niveau le plus bas évoluent individuellement comme la PSO originale, jusqu'au critère d'arrêt (*Figure IV-4(d)*). Il faut noter que le terme « global best » dans cette PSO a été légèrement modifié ici par rapport à la PSO originale. Il se réfère plutôt à la « local global best ». En effet, l'expérience de la meilleure particule globale est limitée dans chaque essaim indépendant. En d'autres termes, dans cette approche, les espaces de recherche parallèles ne communiquent pas horizontalement, mais seulement verticalement. Ces solutions « local global best » sont ensuite renvoyées vers les particules « mères » des essaims du niveau supérieur. Les particules « parents » prennent alors ces valeurs de performance comme les leurs (*Figure IV-4(e)* avec des flèches en amont). Ces essaims du niveau supérieur évoluent également comme la PSO originale.

En plus de cela, chacun des mouvements des particules du niveau supérieur vont générer de nouveaux espaces de recherche au niveau inférieur. Elles vont ensuite recevoir les valeurs de performance et les solutions provenant des sous-problèmes du niveau inférieur, que les particules de niveau supérieur auront précédemment paramétrées (*Figure IV-4* boucle des flèches 3-4-5 et boucle des flèches 1-2-3-4-6-7). Par conséquent, lorsque la valeur de performance est mise à jour sur l'espace de recherche du niveau le plus haut (*Figure IV-4(f)*), ce sont uniquement les particules de cet essaim du plus haut qui évoluent comme la PSO originale (*Figure IV-4(a)*). Ces particules délivrent alors de nouvelles

coordonnées en tant que nouveaux paramètres pour les espaces de recherche du niveau inférieur (*Figure IV-4(b)*). Comme le rayon de lumière se reflétant en permanence entre deux miroirs, le cadre du MLPSO assure la continuité du transfert descendant de paramètre du problème et du transfert ascendant des valeurs de performance. Lorsque le critère d'arrêt de l'espace de recherche du plus haut niveau est atteint, la meilleure particule «global best» au plus haut niveau et toutes les solutions partielles portées par ses particules «enfants» hétérogènes composent, alors, la meilleure solution trouvée au problème d'optimisation multi-niveau.

IV-4. Modules d'amélioration de la performance de la MLPSO

Contrairement à la PSO originale où un seul essaim est généré, la performance de calcul de la MLPSO dépend dans une certaine mesure, de la taille des essaims et du nombre de générations à chaque niveau. Pendant la résolution de problèmes, nous pouvons noter que la PSO compte un nombre d'itérations égal à :

taille de l'essaim × *nombre de générations*

Mais dans une MLPSO à n niveaux, le nombre d'itérations nécessaires devient :

$$\prod_{i=1}^n (\text{Taille de l'essaim}_{\text{niveau } i} \times \text{Nombre de générations}_{\text{niveau } i})$$

Il s'agit évidemment d'une augmentation considérable du temps de calcul. La réduction de la taille de l'essaim et du nombre de générations réduira ce temps de calcul, mais affectera aussi la qualité de la solution trouvée. Des mesures correctives supplémentaires visant à améliorer la performance de cette MLPSO originale, en termes de temps de calcul et de qualité de solutions ont été proposées. Ces mesures comprennent trois axes :

- Un critère d'arrêt dynamiques de l'exploration des sous essaims, qui analyse les valeurs de performance de l'essaim courant et permet un arrêt anticipé ;

- Un accélérateur de convergence, qui vise à effectuer une recherche approfondie et en forçant la recherche à s'orienter vers le minima local le plus proche ;
- Une mémoire inter-niveau permanente, qui conserve, sur la base des particules du niveau le plus haut qui porte la solution, les meilleures positions des particules des niveaux inférieurs, afin d'éviter que, sur le niveau le plus haut, des particules repassent aux positions déjà visitées, entraînant une ré-exploration de tous les niveaux inférieurs.

Le calcul parallèle est également mis en œuvre en mettant à profit de la structure fortement parallèle de la MLPSO :

- L'interaction entre niveaux est uniquement hiérarchique, et des niveaux inférieurs sont horizontalement indépendants. Chaque essaim ne communique avec ses essaims de « parents » ou « enfants ». Il n'y a jamais échanges avec les essaims sur autres branches.
- L'interaction à l'intérieur d'un niveau n'existe que dans l'essaim de plus haut niveau et cette interaction est une corrélation non-temporelle. Par conséquent, aucune perturbation ne sera générée lors du calcul parallèle en raison du fait que ces sessions parallèles n'ont pas besoin d'être synchronisées.

Par conséquent, ce cadre de calcul parallèle crée plusieurs sessions de la MLPSO complètement symétriques ; chaque session contient le même nombre de particules de l'essaim au plus haut niveau. Selon les règles de la PSO, au plus haut niveau, la valeur de performance et les coordonnées de la particule *gbest* sont partagées entre les sessions symétriques. La [Figure IV-5](#) illustre un exemple d'une MLPSO à trois niveaux séparé en trois sessions parallèles. Puisque la coordination entre sessions peut entraîner la perte de l'efficacité de calcul parallèle, cette division verticale minimise la coordination entre sessions. Seule l'information de la particule *gbest* doit être partagée et mise à jour par toutes les sessions. Les expérimentations spécifiques que nous avons conduites confirment qu'avec le calcul parallèle à 4 sessions, le processus est de 2,5 fois plus efficace qu'un calcul mono session.

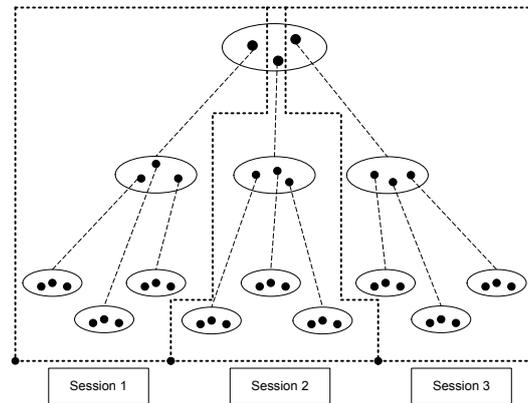


Figure IV-5 Exemple de multi-sessions MLPSO

IV-4.1. Critère d'arrêt dynamique de sous essaim

Selon le mécanisme récursif de la MLPSO, une faible réduction du nombre de générations à chaque niveau peut réduire considérablement le temps de résolution, mais cela risque d'entraîner une plus mauvaise performance de convergence. Inspiré par la méthode de branch & bound (Clausen, 1999), le critère d'arrêt dynamique des sous essaims fournit un mécanisme spécial qui analyse la performance de l'essaim courant, et prévoit un arrêt si cet essaim oriente sa recherche dans une direction non pertinente. Au contraire, un sous essaim se dirigeant dans une direction pertinente sera en mesure d'améliorer en permanence sa valeur de performance jusqu'à ce que le nombre d'arrêts prédéfini soit atteint. Par conséquent, avec ce critère d'arrêt dynamique, le paramètre « nombre de génération » pour un niveau devient nombre maximum de génération pour tous les sous essaims de ce niveau.

Le gain en temps de résolution est encore plus significatif quand il est effectué aux niveaux supérieurs, puisque tout mouvement de particule à un niveau supérieur générera de nouvelles sous essaims aux niveaux inférieurs. Ce mécanisme ne peut être appliqué au niveau le plus haut, car ce niveau possède seulement un seul essaim racine. Un arrêt de cet essaim va conduire à l'arrêt complet de la résolution. Le logigramme de la [Figure IV-6](#) illustre ce mécanisme avec plus de détails.

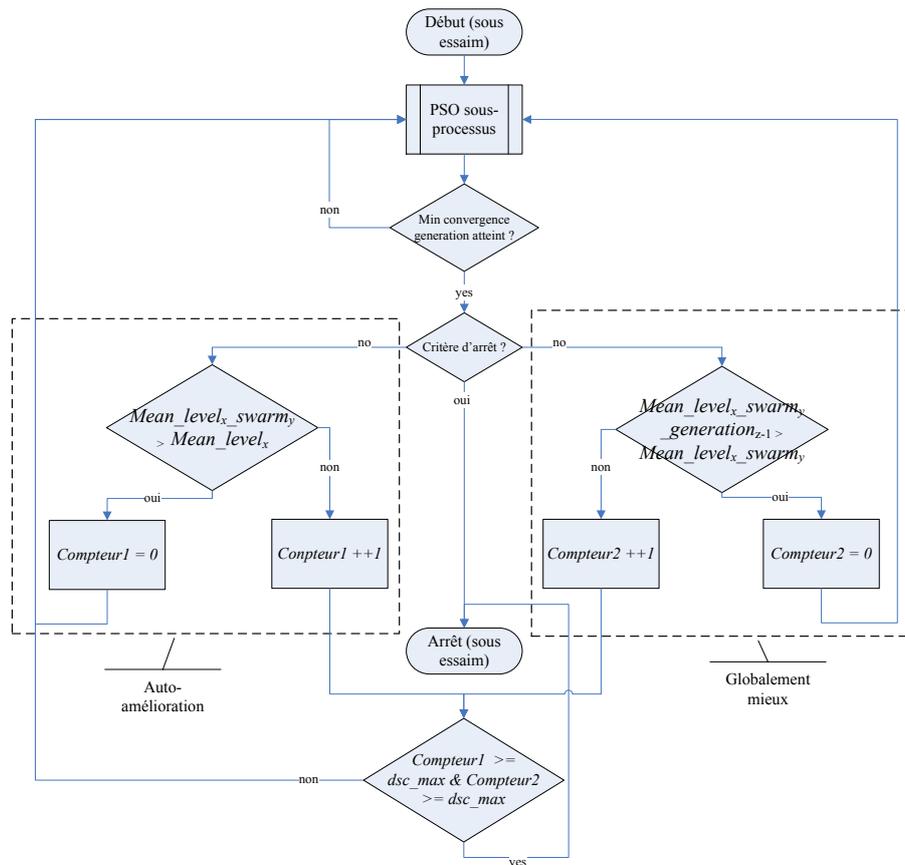


Figure IV-6 Logigramme de critère d'arrêt dynamique

Avant que le critère d'arrêt dynamique des sous essaim ne soit activé, un nombre de génération minimum doit être atteint. Cela doit permettre à ce que les essaims puissent suffisamment évaluer les valeurs de performance pour stabiliser la convergence et éviter un arrêt trop anticipé. Une fois ce nombre de génération minimum atteint, deux groupes de critères d'arrêt seront appliqués :

- Un critère de « globalement mieux » qui vérifie si le sous essaim actuel a globalement un bon rendement en se comparant la moyenne de valeur de la performance du sous essaim courant $Mean_level_x_swarm_y$ avec la moyenne de valeur de performance de tous les sous essaims du même niveau $Mean_level_x$. Ce critère permet qu'un sous-essaim y , globalement supérieur que la moyenne de son niveau x , puisse continuer à évoluer.

- Un critère de « auto-amélioration » qui vérifie si le sous essaim actuel arrive à s’auto-améliorer en se comparant la moyenne actuelle de valeur de la performance du sous essaim courant $Mean_level_x_swarm_y$ avec celle de la génération précédente $Mean_level_x_swarm_y_generation_{z-1}$. Ce critère permet qu’un sous-essaim y s’auto-améliorant puisse continuer à évoluer.

Un compteur est affecté à chaque groupe de critère d'arrêt et est incrémenté chaque fois que ce critère est atteint. Un sous-essaim ne sera arrêté si tous les deux compteurs atteignent un certain nombre dsc_max de génération prédéfini. Si aucune amélioration n'est constatée jusqu'à ce que les deux compteurs atteignent ce nombre, ce sous essaim sera arrêté et détruit. En revanche, chaque constatation positive pour le critère « globalement mieux » ou « auto-amélioration » réinitialisera le compteur correspondant. Une fois cet arrêt dynamique déclenché, le sous essaim actuel sera normalement arrêté, avant le critère d'arrêt statique de la MLPSO.

IV-4.2. Accélérateur de convergence

L'accélérateur de convergence est conçu pour approfondir l’exploitation de la meilleure solution globale trouvée par la MLPSO. Il intervient à chaque fois une meilleure solution globale (i.e. $gbest$) est trouvée par l’algorithme, mais ne partage pas $gbest$ amélioré découvert par lui-même à la MLPSO, ce qui signifie que l’évolution des essaims de la MLPSO ne sera pas être perturbée et reste dans son rôle de l’exploration. Considérant que l'accélérateur de convergence, une fois déclenché, utilise la solution de $gbest$ actuelle comme graine pour initialiser son essaim, si l'accélérateur de convergence partage son $gbest$ avec les autres sessions de la MLPSO, il sera difficile pour ces sessions de réactualiser leur propre $gbest$ et pourra éventuellement provoquer la précocité. En d'autres termes, la MLPSO est principalement dédiée à une recherche basée sur l'exploration et l'accélérateur de convergence est principalement dédié à une recherche basée sur l’exploitation. Le logigramme de la [Figure IV-7](#) illustre ce processus avec plus de détails. Comme nous pouvons le voir, l'accélérateur de convergence récupère la solution $gbest$ de l'algorithme MLPSO de façon unidirectionnelle, et il met à jour seulement sa propre liste des $gbest$ indépendants.

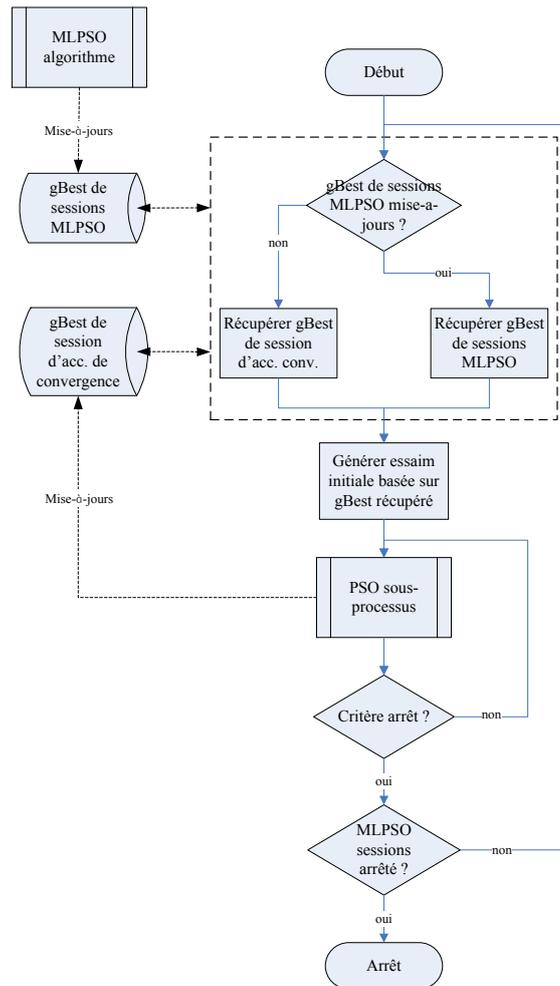


Figure IV-7 Logigramme de l'accélérateur de convergence

Afin de maintenir la généricité de la MLPSO, la configuration de cet accélérateur de convergence reste transparente pour la modélisation. Les principales caractéristiques de cet accélérateur de convergence consistent en ce qui suit :

- Existence en tant que session spéciale qui initialise de nouveaux essais à différents niveaux suivants la dernière solution *gbest*.
- Pérennité de la solution de haut niveau : En tant qu'un rôle proche de la recherche locale, la solution du plus haut niveau reste fixée.
- Mécanisme de permutation : les coordonnées d'un nombre aléatoire de particules seront permutées entre elles pour générer de nouvelles

solutions réalisables avec une valeur de performance meilleure que la solution de *gbest* actuelle. Cette permutation aidera la recherche d'optimum local en générant des solutions hybridées.

- Actualisation des *gbest* : Une fois son critère d'arrêt atteint, si les sessions de la MLPSO ont pu réactualiser leurs *gbest*, l'accélérateur de convergence utilisera ce nouveau *gbest* en tant que nouvelle graine pour relancer le processus, sinon il utilisera *gbest* trouvé par lui-même comme nouvelle graine pour redémarrer.

Comme nous l'avons dit, pour la version originale de la MLPSO (sans modules d'amélioration de la performance), les résultats expérimentaux ont montré que celle-ci était en mesure d'assurer la convergence à travers plusieurs niveaux, mais qu'il y avait un temps de calcul assez long. Ces modules d'amélioration de la performance sont conçus pour compenser ce défaut. Même si la MLPSO devient plus compliqué par la suite, la généricité sur la modélisation reste analogue à la MLPSO originale.

IV-4.3. Mémoire inter-niveau permanente

Selon le mécanisme de la MLPSO, l'essaim de niveau le plus haut existe en permanence durant la résolution. À l'inverse, les essaims de niveau inférieur sont régénérés par le déplacement de leurs particules « mères » et détruits par leurs propres critères d'arrêt. Par conséquent, une particule « mère » qui revisite une solution déjà visitée déclenchera la génération et l'exploration des essaims de niveau inférieur, pourtant déjà effectué auparavant. Cela est dû à un effacement de la mémoire pour les niveaux inférieurs. En effet, selon la démarche originale de la PSO, les résultats d'exploration des essaims non-permanents ne sont pas mémorisés une fois le critère d'arrêt atteint. Dans le cas d'une recherche multi-niveaux, le critère d'arrêt final n'était pas atteint, ce phénomène peut provoquer des calculs répétitifs, ce qui affectera le temps de résolution.

La mémoire inter-niveau permanent est conçue, dans l'esprit d'une liste taboue (Glover et Laguna, 1997) pour établir et entretenir une base de données indépendante. Cette mémoire conserve toutes les solutions explorées par les particules de l'essaim du plus haut niveau, et la meilleure solution complète liée à cette solution « mère », y compris les meilleures solutions trouvées par tous les

niveaux inférieurs. Le logigramme de la *Figure IV-8* illustre ce processus avec plus de détails.

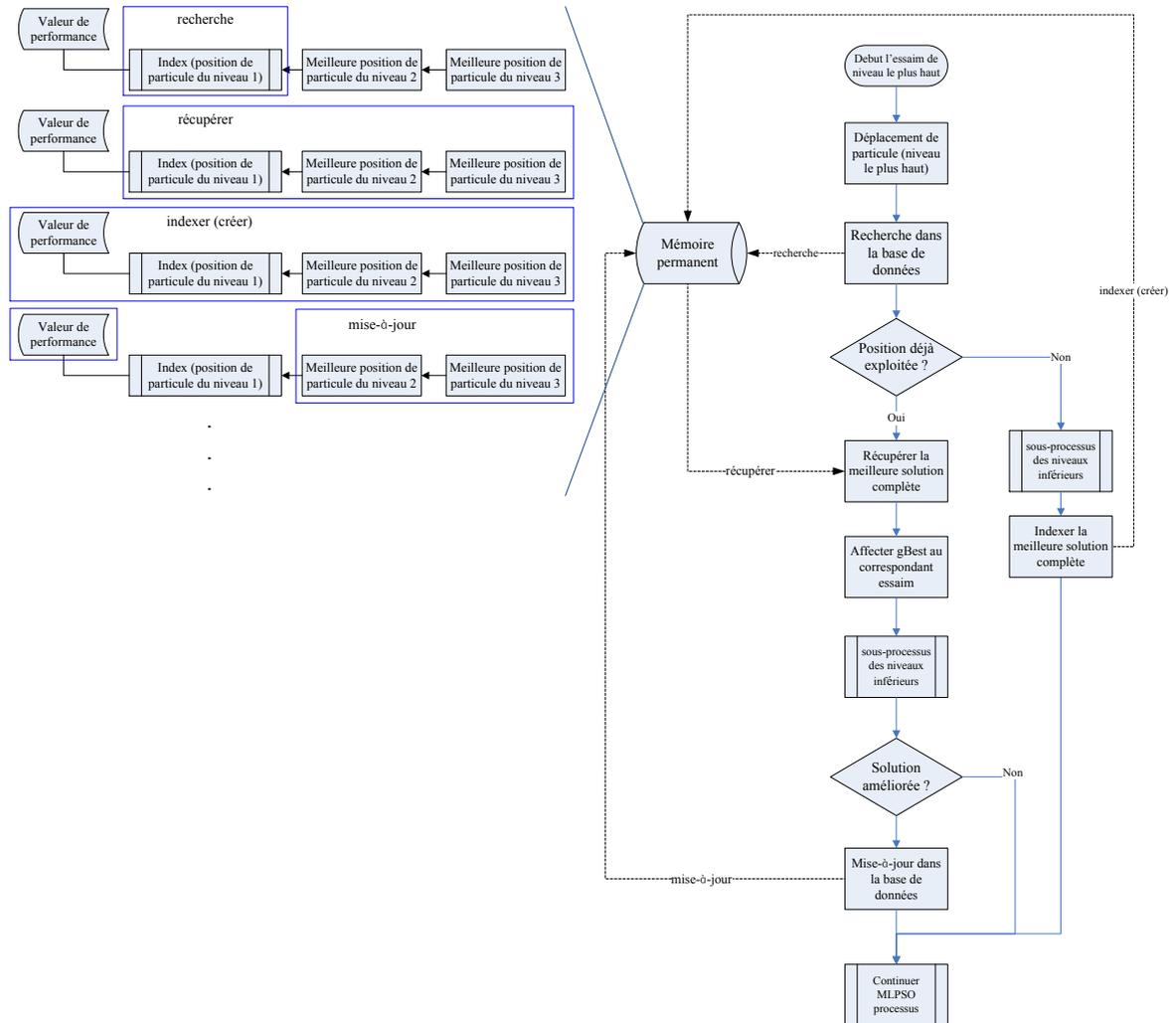


Figure IV-8 Logigramme de mémoire Inter-niveau permanent

Dès qu'une particule de l'essaim de niveau le plus haut se déplace, ce mécanisme vérifie si la solution correspondante n'est pas déjà enregistrée dans la base de données. Sachant que l'index de recherche est réservé uniquement pour la solution de l'essaim de niveau le plus haut. Si c'est le cas, ce mécanisme récupère la solution complète et affecte *gBest* au niveau correspondant en initialisant ces essais. Ainsi cette nouvelle recherche sur la position visitée peut reprendre la

mémoire et continuer l'exploitation, au lieu de la recommencer. A la fin de cette exploitation, si une meilleure solution est trouvée, une mise à jour de base de données sera effectuée. S'il s'agit d'une solution non-enregistrée dans la base de données, à la fin de l'exploitation, la meilleure solution complète sera indexée dans la base de données.

Cette mémoire inter-niveau permanente conserve le meilleur résultat des phases précédentes, évitant ainsi de recommencer le travail, mais il n'empêche pas de continuer l'exploitation, ce qui fait que cette mémoire joue un rôle de relais entre une solution déjà exploitée et une solution à ré-exploiter. Il faut noter que comme l'index de mémoire est basé sur la solution après la structuration de la position des particules. Cela correspond plutôt à une solution discrète. Dans le cas d'un espace de recherche continu, revisiter la même solution est quasiment impossible, mais on peut mettre en place un intervalle de voisinage pour caractériser la similitude de deux solutions.

IV-5. Historique du développement

La structuration et les évolutions de la MLPSO sont liées étroitement au développement des solveurs. En tant qu'approche basée sur une méta-heuristique, il est difficile de déterminer sa performance et son rendement sans la démarche expérimentale. C'est souvent en réalisant les différentes versions du solveur que l'on s'est rendu compte de la limite applicative concrète et que nous sommes arrivés à proposer de nouveaux axes de travail.

Le développement des solveurs de la MLPSO a suivi trois phases principales. La phase 1 était sur la réalisation d'un premier prototype de faisabilité. Pour répondre au besoin d'amélioration de la performance de calcul, la phase 2 s'est concentrée sur la réalisation d'une version plus efficace en termes de calcul. Basée sur une analyse des premières expérimentations, la phase 3 s'est consacrée à l'amélioration de la MLPSO en ajoutant les modules que nous avons présentés.

IV-5.1. Phase 1

Au début de cette phase de développement, la MLPSO restée une conception sur papier, l'objectif de cette phase était donc de réaliser rapidement un prototype pour valider la faisabilité globale de cette nouvelle approche. Dans cette première phase, Visual Basic a été utilisée comme langage de

programmation. Il a été choisi car il permet le développement rapide d'applications, la création d'interfaces graphiques, et l'accès aux bases de données en utilisant les technologies DAO, ADO et RDO. Le fait qu'il faille gérer des espaces de recherche multi-niveaux et des essais parallèles, une base de données est nécessaire pour la définition et la gestion de cette structure de données complexes. En même temps, la caractéristique de la structure du MLPSO fait qu'une base de données relationnelle correspond bien pour la représenter. Microsoft Access a été utilisé comme SGBDR vu sa compatibilité avec Visual Basic.

Le solveur développé dans cette phase a traduit le problème du projet de la Mutualité de la Loire en trois niveaux correspondant respectivement à : la localisation des installations, l'affectation des clients et la définition des tournées de véhicule. Il faut rappeler que c'est la MLPSO originale sans module d'amélioration qui est appliquée dans cette première phase.

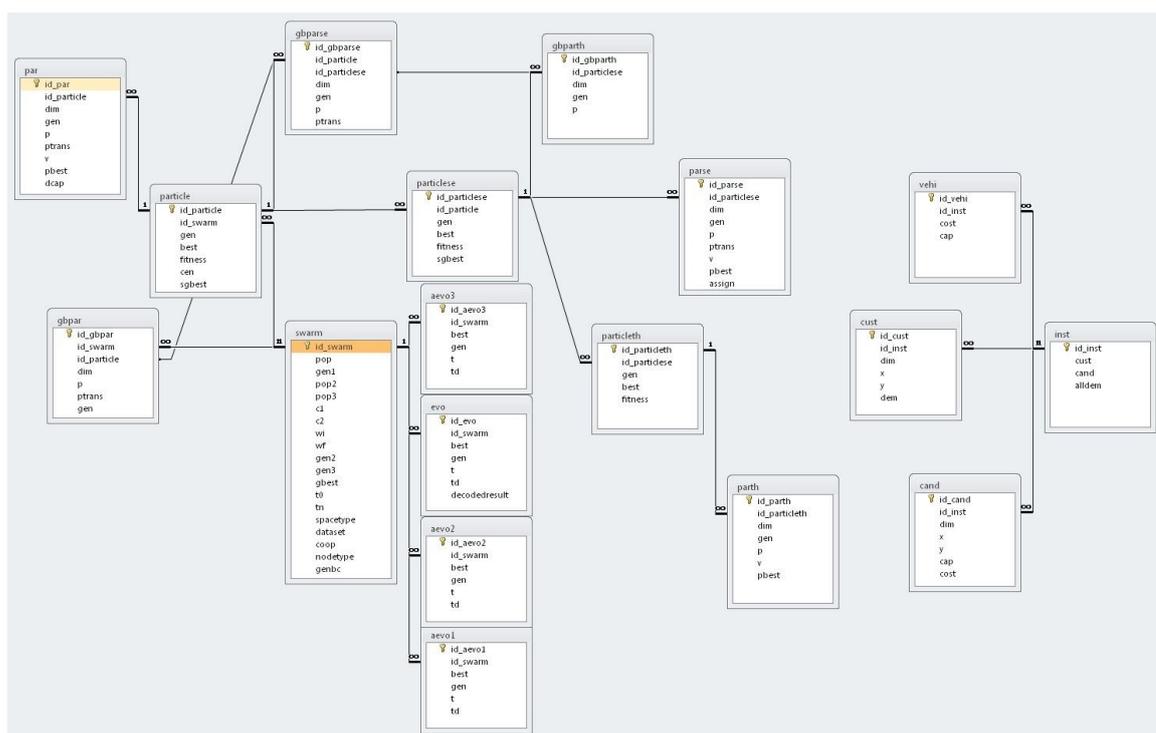


Figure IV-9 Conception du modèle de données de la version VB + Access

La [Figure IV-9](#) représente la conception du modèle de données pour une MLPSO à trois niveaux. La partie de droite représente le modèle de données de

l'instance. Sur la partie gauche on peut retrouver la structure hiérarchisée de la MLPSO : *swarm* (1 --> n) *particle* (1 --> n) *particlese* (e.g. particule du niveau 2) (1 --> n) *particleth* (e.g. particule du niveau 3).

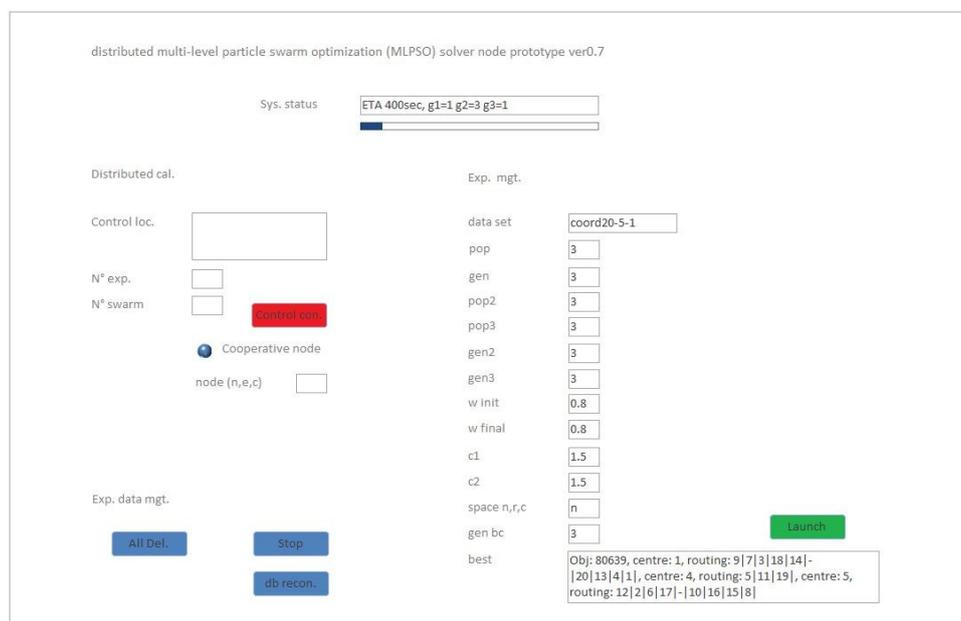


Figure IV-10 Interface du solveur de la version VB + Access

La [Figure IV-10](#) représente l'interface du solveur, elle sert à paramétrer chaque résolution. Par rapport à la PSO originale, elle possède un ensemble de paramètres (taille de population et nombre de générations) pour chaque niveau.

Le solveur codé avec Visual Basic et Access a validé la faisabilité du MLPSO, mais il a montré un problème de performance de calcul. Vu la profondeur du modèle de données et la quantité de manipulation des données générée par la résolution, les requêtes sur la base de données occupent la plupart du temps de résolution. De plus, le fait que Visual Basic soit un langage de programmation interprété rend aussi l'exécution peu efficace.

Une version de démonstration de ce solveur a été développée sur la base de solveur standard, il permet notamment d'illustrer la communication et la présentation du processus décisionnel de la MLPSO. La [Figure IV-11](#) montre l'interface de cette version. Le paramètre de la taille de population est, ici, fixé (3 particules par l'essaim de tous les niveaux) afin de faciliter la représentation graphique. La démonstration est assez explicative, le schéma à gauche qui

représente les essaims évolue de façon synchronisée avec les données du milieu qui représente en temps réel l'agrégation de la valeur de performance.

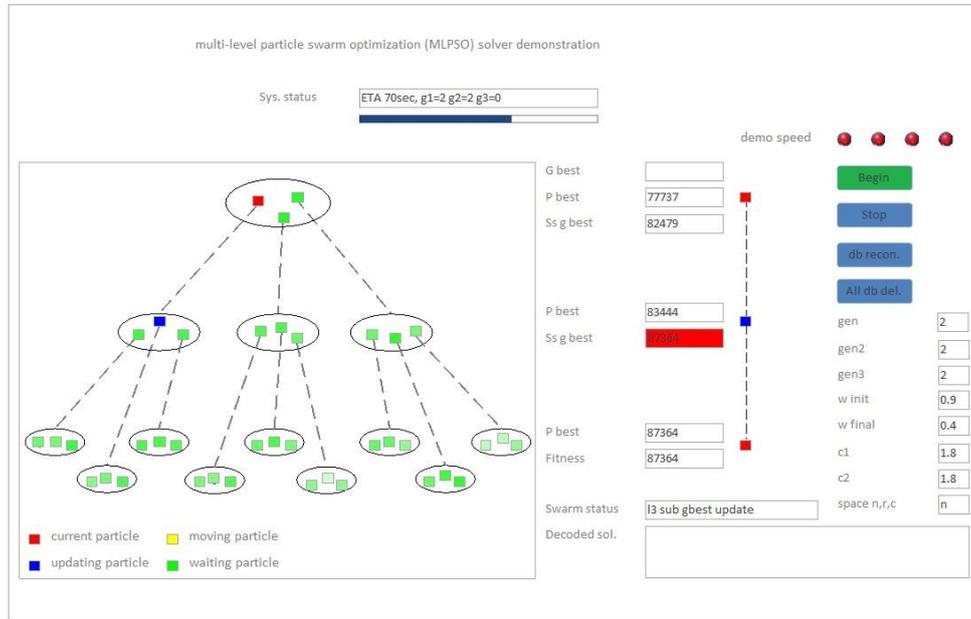


Figure IV-11 Interface de la démonstration de la version VB + Access

IV-5.2. Phase 2

Pour améliorer la performance de calcul, un langage de programmation compilé a été adopté dans cette phase de développement. Au-delà de cela, le langage C# permet aussi la création d'applications capables d'effectuer plusieurs tâches simultanément. Cette possibilité, appelée « modèle multithread » ou modèle de thread libre, est un moyen puissant de conceptions de composants sollicitant beaucoup le processeur et nécessitant une adaptation d'architecture de calcul parallèle. En plus, au lieu de manipuler les données par un SGBD, les structures de données arborescences sont déclarées dans cette phase. Les données sont manipulées directement par le pointeur sans aucun processus de requête, ce qui réduit énormément le temps de résolution.

```

mlpsa_v1_1_0 - Shortcut
MLPSO v1.1.0(c#) local multithread version
18-01-2015 19:39:54
Preconfigured excution ? <y/n>
y
Input preconfigured file :
ch
Parallel thread no: 4
<Gen * Pop> Level 1 : 3 * 3 Level 2 : 10 * 10 Level 3 : 10 * 10
no  obj  time(ms)
solution found / branch finished / total branche  time(ms)  memory counter
Ready, press Enter to start :>
Parallel thread n0 decoding 1st gen ...
Parallel thread n4 decoding 1st gen ...
1 80383 3266.2184
2 78060 3268.5321
3 76173 3270.9145
4 72873 3276.522
5 71191 3277.5245
6 70630 3281.5123
Parallel thread n0 generation done
Parallel thread n4 generation done
Parallel thread n3 decoding 1st gen ...
Parallel thread n3 generation done
Parallel thread n2 decoding 1st gen ...
Parallel thread n2 generation done
7 70203 3452.8736
8 69996 3469.9248
35206 / 42125 / 120000 5676.727 5
9 69641 6424.3926
10 69092 6435.0705
11 68125 7750.3185
12 67297 7753.1652
13 67183 7758.6235

```

Figure IV-12 Interface du solveur de la version C#

La *Figure IV-12* montre l'interface de ce solveur en C#, on peut constater que le solveur est paramétré ici pour gérer 4 sessions simultanément pour la résolution d'une instance. Dans cette phase de développement, il s'agit toujours de la MLPSO originale sans module d'amélioration. En termes de gain sur l'efficacité du calcul, sans activer multi-thread (comme la version Visual Basic ne supporte pas) cette seconde version va 400 fois plus vite que le solveur développé

en phase 1. Les travaux (Chen et al, 2013) sont réalisés à partie de la MLPSO de cette phase.

IV-5.3. Phase 3

Cependant, malgré ce gain de performance important, la croissance de la quantité de calculs est exponentiellement associée à l'augmentation de la taille de population et au nombre de générations de tous les niveaux. Cela rend l'approche proposé inapplicable pour des instances importantes. Cette phase de développement donc a été consacrée aux modules d'amélioration de l'approche. Les expérimentations sont réparties en deux axes. En utilisant les instances de benchmark, on mesure l'influence des paramètres des essais sur la croissance de la quantité de calcul. Cette mesure justifie l'intérêt du module de critère d'arrêt dynamique des sous essaim et la mémoire inter-niveau. D'autre part, quelques instances simples ont été créées pour observer le comportement de l'approche sous un paramètre faible. Sachant qu'un essaim de la taille réduite est attiré plus systématiquement vers un optimum local.

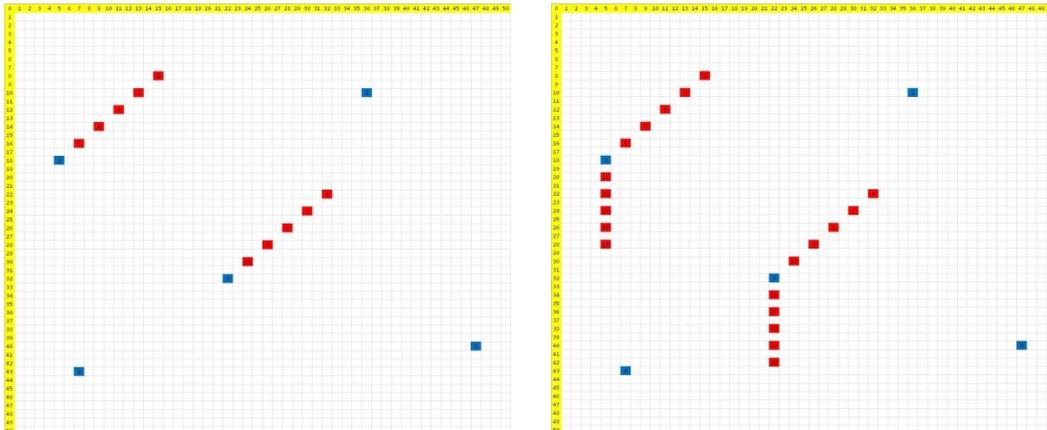


Figure IV-13 Instances de teste 1a, 1b

La [Figure IV-13](#) montre deux instances de test (1a à gauche, 1b à droite). Les points bleus représentent les dépôts candidats, ceux en rouges représentent les clients. Le solveur est efficace pour l'instance 1a mais n'arrive pas à trouver la solution optimale sur l'instance 1b avec un paramètre faible. Pour résoudre ce problème, une session de recherche d'optimum local par permutation a été ajouté afin d'arriver plus vite vers l'optimum. Ces tests ont permis de valider l'intérêt du

module d'accélération de convergence qui fonctionne en parallèle que les tâches de la MLPSO.

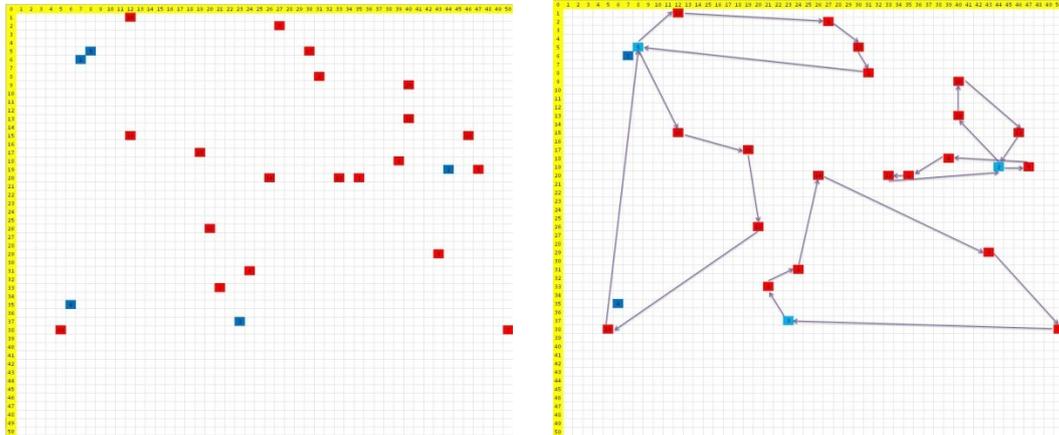


Figure IV-14 Instance et solution de teste 2

La [Figure IV-14](#) montre une autre instance de test plus complexe. Nous avons suivi du comportement de la MLPSO en combinant les modules d'amélioration développé à l'aide de ce test de la taille relativement petit. La participation et la contribution de tous les modules d'amélioration ont été bien observées : l'accélération de convergence a permis d'améliorer les résultats issus des sessions de la MLPSO. Les sous-essais interrompus par le critère d'arrêt dynamique sont en effet instanciés à partir des particules « mères » de mauvaise qualité, et la mémoire inter-niveau permanente a permis que certains bonnes solutions puissent continuer à évoluer dans les nouveaux sous-essais. Le solveur enfin arrive à trouver la solution optimale sans un paramètre important.

IV-6. Conclusion

Le cadre de résolution de la MLPSO par rétroaction est basé sur une hypothèse fondamentale : l'impossibilité de connaître la performance de la solution générée au niveau dominant en raison de l'incertitude et de l'imprécision des données et des perturbations subies par les solutions relatives au niveau dominé. La caractéristique de la sous-structure optimale feedback empêche de résoudre progressivement un problème d'optimisation multi-niveau. Par conséquent, la MLPSO adopte un cadre de résolution en faisant générer et agréger

d'une façon récursive des espaces arborescents de solutions. Cette conception « fidèle » à la manière qu'un problème multi-niveaux converge rend le processus de résolution consommateur en temps de calcul. Pour cela trois modules ont été développés afin de renforcer la méthode initiale. Dans le chapitre suivant, la MLPSO est appliquée sur deux problèmes multi-niveaux différents considérés comme des classiques de la littérature. Les résultats sont ensuite analysés pour une compréhension plus concrète du comportement de la méthode.

Chapitre V :

Applications et analyses du MLPSO

V-1. Applications du MLPSO

Dans un but de démonstration et d'évaluation des performances, deux applications différentes, considérées comme des classiques de la littérature, ont été développées ici : Un problème d'ordonnancement de flow shop hybride avec tâches multiprocesseurs (HFSMT) qui illustre un problème d'optimisation multi-niveaux **homogène** ; et un problème de localisation et de routage avec capacité limitée (CLRP) qui illustre un problème d'optimisation multi-niveaux **hétérogène**.

Le solveur MLPSO est codé en C # en utilisant .Net framework 4.5, il est testé sur un ordinateur portable avec un Intel ® 2.7GHz Core i7 CPU et 8 Go de RAM. Sachant que ce processeur est capable d'exécuter 8 sessions simultanément, le solveur est configuré pour réserver 7 sessions pour la MLPSO et une session pour l'accélérateur de convergence.

V-1.1.HFSMT

Nous nous consacrons ici à l'analyse comparative de nos résultats avec ceux de la littérature (Kahraman et al., 2010) concernant la résolution du problème de flow shop hybride avec tâches multiprocesseurs (HFSMT). Ce problème de flow shop hybride est NP-difficile au sens fort (Gupta et al., 1997).

HFSMT est un problème d'ordonnancement de production. Il rentre dans la famille des flow shop hybrides (HFS) qui correspond à une structure dans laquelle le problème de flow shop et le problème d'ordonnancement sur machines parallèles sont combinées ([Figure V-1](#)). Dans le problème d'ordonnancement HFS, on suppose qu'il existe n tâches et chacune doit être traitée dans le même ordre dans un ensemble de flow shop à k -étages. À chaque étage i , il existe m_i machines identiques en parallèle, chaque tâche j nécessite une machine pour être traitée. La restriction d'une seule machine par tâche est relaxée dans HFSMT. Un nouveau paramètre req_{ij} est introduit pour définir la demande de machines pour la tâche j à l'étage i . Le critère d'optimisation que nous utilisons ici est la minimisation de makespan.

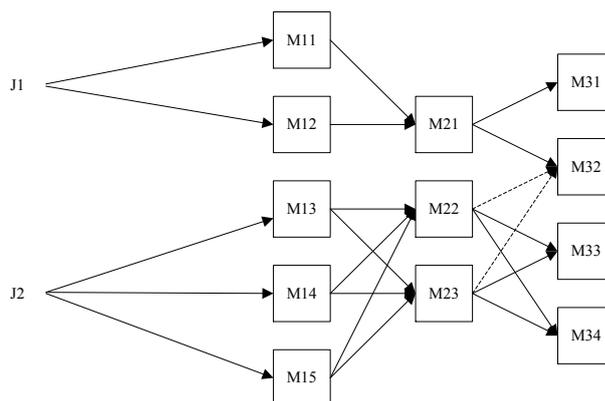


Figure V-1 Exemple du HFSMT

V-1.1.1. Implémentation

Le HFSMT est modélisé par une structure de n niveaux à l'aide du MLPSO. Chaque niveau correspond à un étage de l'ordonnement des tâches (*Figure V-2* pour le cas de 2 étages). En tant qu'un problème d'optimisation multi-niveaux homogènes, la MLPSO applique n niveaux identiques en n étages du HFSMT.

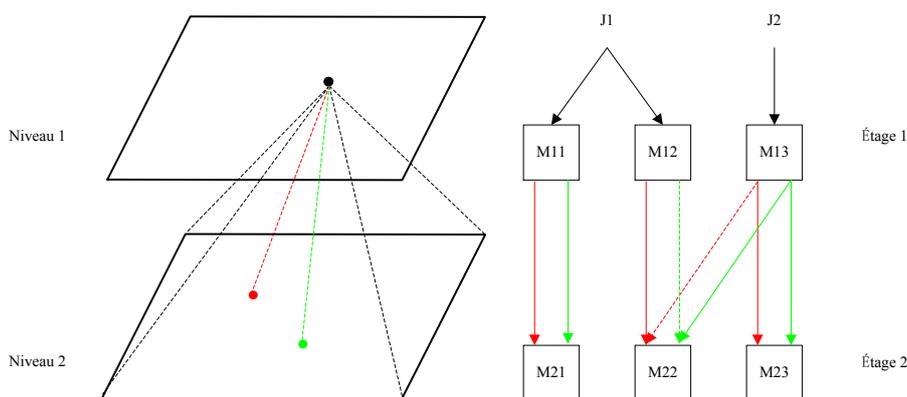


Figure V-2 Schéma de la modélisation du HFSMT à 2 étages par la MLPSO à 2 niveaux

Ces niveaux identiques définissent la séquence d'exécution des tâches. Le nombre de dimensions de l'espace de recherche est le même que le nombre de tâches. Chaque dimension représente la position d'une tâche dans la séquence d'exécution. Pour définir une solution initiale, une valeur aléatoire est prise initialement $L_{kj} \sim U(0,1)$, ce qui représentera le positionnement de la tâche j par rapport aux autres tâches à l'étage k . Une liste de L_{kj} triée dans l'ordre croissant

donne l'ordre d'exécution. Dans le cas des 5 tâches illustré à la [Figure V-3](#), une tâche obtient la plus haute priorité lorsque sa valeur est la plus proche de la borne gauche. Cette méthode de la projection simple permet de transformer l'espace de recherche continu vers un espace de recherche discret. Dans ce cas-là, l'ordre d'exécution trié est alors $L_{k1} - L_{k2} - L_{k4} - L_{k5} - L_{k3}$. Puisque le HFSMT a des contraintes sur des machines parallèles et machines multiples, le processus de la projection inverse vérifie la disponibilité des machines et les remplit successivement selon la liste triée.

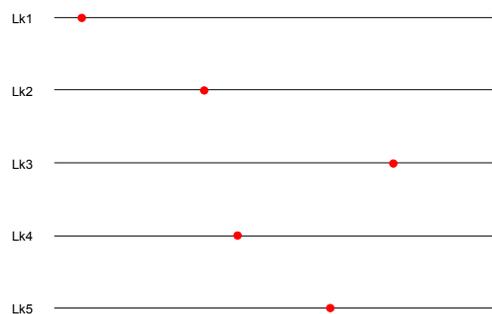


Figure V-3 La projection de l'espace de recherche du niveau universel

Une fois les particules dans le niveau le plus bas sont atteinte, la solution est complète et peut être évaluée. Selon la caractéristique du MLPSO, à chaque particule de haut niveau est associée de multiples particules de son niveau dominé. Cela correspond aussi au fait qu'une solution d'ordonnancement faite pour l'étage 1 peut se décliner en de nombreuses possibilités d'ordonnancement pour l'étage 2, comme l'exemple illustré à la [Figure V-2](#). Après l'évaluation des essaims du niveau 2, seule la particule possédant *gbest* remontera sa solution à sa particule « mère », ce qui permet d'affecter la valeur de performance à cette particule « mère » au lieu d'une évaluation comme pour les particules du niveau au-dessous. L'évolution des particules « mère » redéclenche ce cycle, jusqu'à l'arrêt de ce niveau dominant.

V-1.1.2. Analyse des résultats

Selon la structure multi-niveaux du MLPSO, il n'y a théoriquement pas de limite au nombre d'étages de flow shop. Toutefois, compte tenu de la croissance exponentielle du temps de calcul par rapport au nombre de niveaux, nous avons limité pour le HFSMT à $k = 2$. Même avec cette limite, le problème correspondant

est toujours NP-difficile au sens fort (Hoogeveen et al., 1996). Le [Tableau V-2](#) donne extrait des benchmark de référence, 30 cas avec deux étages ont été testés avec de différentes configurations de 10, 20 et 50 tâches.

Tableau V-1 Paramètres du solveur HFSMT

niveau 1	<i>nombre de particules</i>	200
	<i>nombre de générations</i>	200
niveau 2	<i>nombre de particules</i>	200
	<i>nombre max de générations</i>	200
PSO	<i>c1</i>	1.4962
	<i>c2</i>	1.4962
	<i>ωi</i>	0.7968
	<i>ωf</i>	0.7968
Critère d'arrêt dynamique	<i>min génération de convergence</i>	10
	<i>compteur de critère d'arrêt dynamique</i>	3

En ce qui concerne les paramètres du MLPSO, des paramètres « neutres », issus de la littérature, ont été utilisés pour les deux facteurs d'apprentissage et deux coefficients d'inertie (Trelea, 2003).

En ce qui concerne le critère d'arrêt dynamique, la MLPSO a été configuré avec un minimum de 10 générations de convergence et 3 générations pour *dsc_max* (§IV-4.1). Cela signifie que, lorsqu'un sous-essaim est initialisé, ses 10 premières générations ne sont pas évaluées par le critère d'arrêt dynamique. Cela permet de former la convergence. De plus, un maximum de 3 générations consécutives au cours de laquelle ni l'auto-amélioration, ni l'amélioration globale ne sont détectée lancera l'arrêt anticipé de la recherche dans ce sous-essaim.

La résolution de l'ensemble des instances utilise le même ensemble de paramètres afin de se positionner exclusivement sur le processus de benchmark. Ces paramètres sont présentés dans le [Tableau V-1](#). Comparé aux paramètres de la modélisation pour un problème à trois niveaux telle que le CLRP, les essais sont plus grands car le nombre de niveaux est passé de 3 à 2. Le [Tableau V-2](#) montre les résultats de cette expérimentation pour les 30 instances.

Tableau V-2 Résultats de HFSMT Benchmark

instance	MLPSO	GA	PGA	Cpu(s)
P10S2T01	0.005	0.000	0.000	5.1
P10S2T02	0.014	0.000	0.000	3.5
P10S2T03	0.029	0.060	0.060	7.9
P10S2T04	-0.022	0.000	0.000	2.7
P10S2T05	0.021	0.000	0.000	2.7
P10S2T06	0.010	0.000	0.000	2.5
P10S2T07	-0.008	0.000	0.000	2.7
P10S2T08	0.111	0.000	0.000	5.9
P10S2T09	0.005	0.000	0.000	2.7
P10S2T10	0.022	0.000	0.000	2.7
P20S2T01	0.056	0.020	0.017	213.2
P20S2T02	0.069	0.024	0.013	202.5
P20S2T03	-0.009	0.000	0.000	31.2
P20S2T04	0.081	0.000	0.000	172.3
P20S2T05	0.009	0.000	0.000	56.9
P20S2T06	0.077	0.000	0.000	240.2
P20S2T07	0.037	0.003	0.003	182.7
P20S2T08	0.000	0.003	0.003	460.6
P20S2T09	0.004	0.000	0.000	5.7
P20S2T10	0.007	0.000	0.000	247.0
P50S2T01	0.145	0.018	0.011	2754.2
P50S2T02	0.042	0.000	0.000	2585.9
P50S2T03	0.163	0.006	0.002	2381.6
P50S2T04	0.152	0.012	0.014	597.0
P50S2T05	0.170	0.004	0.006	2482.5
P50S2T06	0.012	0.000	0.000	1804.0
P50S2T07	0.106	0.027	0.021	2783.5
P50S2T08	0.016	0.000	0.000	382.5
P50S2T09	0.049	0.000	0.000	1151.5
P50S2T10	0.104	0.003	0.001	237.0

Dans le cadre du HFSMT, un estimateur est utilisé comme une borne inférieure (LB) du makespan. Il a été développé par Oğuz et al. (Oğuz et al., 2004) est défini comme suit:

$$LB = \max_{i \in M} \left\{ \min_{j \in J} \left\{ \sum_{k=1}^{i-1} p_{kj} \right\} + \frac{1}{m_i} \sum_{j \in J} p_{ij} req_{ij} + \min_{j \in J} \left\{ \sum_{k=i+1}^m p_{kj} \right\} \right\}$$

Où J est l'ensemble des tâches, M est l'ensemble des étapes, p_{ij} est le temps de traitement de la tâche j à l'étape i et m_i est le nombre de machines parallèles de l'étape i . Les résultats sont présentés en termes de gap relatif par rapport à cette borne inférieure. Cette expression de la borne inférieure introduit un temps en moyen lié à la demande des machines parallèles ($\frac{1}{m_i} \sum_{j \in J} p_{ij} req_{ij}$). Elle n'est donc qu'un estimateur, cela explique les gaps négatifs présents dans nos expérimentations.

Dans le [Tableau V-2](#), la colonne « instance » représente la taille du problème où x dans $PxS2Ty$ définit le nombre de tâches. La colonne GA représente l'écart relatif par rapport à l'algorithme génétique développé par Oğuz et Fikret (Oğuz et Fikret, 2005), et la colonne PGA représente le gap relatif par rapport à une heuristique gloutonne et parallèle développée par Kahraman et al. (Kahraman et al., 2010). Les résultats des 30 instances montrent que la qualité des résultats du MLPSO est similaire aux algorithmes de référence. La MLPSO fournit des résultats améliorés dans les cas P10S2T04, P10S2T07, P20S2T03 et P20S2T08.

Nous pouvons valider l'applicabilité et la nature générique du MLPSO dans la résolution du problème HFSMT. Il est important de noter que les GA et PGA effectuent un réglage individuel des paramètres instance par instance et que ce temps de paramétrage n'est pas inclus dans la colonne Cpu(s).

V-1.2. CLRP

Nous nous intéressons ici à une autre analyse comparative de nos résultats avec ceux de la littérature (Prins et al., 2004) pour résoudre, cette fois-ci, le problème de localisation et de routage avec une capacité limitée (CLRP). Le CLRP consiste à sélectionner un ou plusieurs dépôts logistiques à partir d'un ensemble d'emplacements candidats prédéfinis, et à concevoir pour chaque dépôt ouvert un certain nombre de parcours afin de fournir les besoins d'un ensemble de clients connus. Chaque dépôt logistique est associé à un coût d'ouverture fixe et une capacité qui limite la quantité de livraison. Il existe aussi un coût fixe et une

capacité associé aux véhicules. Dans cette étude, l'objectif est de minimiser les coûts fixes pour les dépôts logistiques et les véhicules, ainsi que les coûts des parcours opérés par les véhicules. Ce type de problème est conceptuellement très proche du problème initiateur de cette thèse, celui de la mutualisation des équipements de production dans un réseau de santé.

Les travaux de recherche de référence de Prins et al. (Prins et al., 2004) ont proposé 30 instances représentant les différents scénarios dans lesquels le nombre de clients varie de 20 à 200. Le nombre de dépôts candidats varie de 5 à 10. Les clients sont regroupés en 1 ou 3 groupes dans lesquels leur localisation géographique n'est pas uniforme.

V-1.2.1. Implémentation

Le CLRP a été modélisé dans une structure de trois niveaux en utilisant la MLPSO:

- la localisation du dépôt logistique ;
- l'attribution de client au dépôt sélectionné ;
- et la définition des tournées de véhicules pour chaque dépôt.

Comme nous l'avons dit, en décomposant le problème initial, la modélisation de l'espace de recherche pour chaque niveau est simplifiée par rapport à la modélisation du problème intégral.

V-1.2.1.1. Niveau 1 – la projection de l'espace de recherche

Le niveau 1 détermine les dépôts qui seront choisis parmi tous les candidats. À ce niveau, le nombre de dimensions de l'espace de recherche est le même que le nombre de candidats. Pour la construction de la solution initiale, chaque dimension, qui représente un candidat, prend initialement une valeur aléatoire $L_{ix} \sim U(0,1)$. Une liste triée en ordre ascendant du résultat $|L_{ix} - 0.5|$ fournit une liste de priorité. Dans le cas de cinq candidats (*Figure V-4*), un des candidats obtient la priorité la plus élevée lorsque son nombre aléatoire est le plus proche de la valeur médiane. Donc, sur ce cas, la liste triée des candidats est alors $L_{14} - L_{15} - L_{12} - L_{13} - L_{11}$. Le nombre des dépôts sélectionnés dépend de leur capacité et la demande totale des clients. Le mécanisme du MLPSO modifie L_{ix} , dimension par dimension. Pour chaque dimension, son espace topologique est un

anneau, ce qui signifie un mouvement vers la gauche pour une coordonnée près de la borne gauche le fera apparaître près de la borne droite.

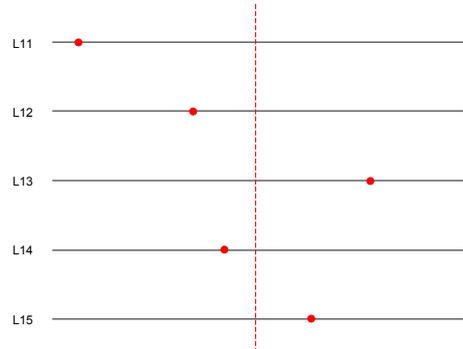


Figure V-4 La projection de l'espace de recherche du niveau 1

V-1.2.1.2. Niveau 2 –la projection de l'espace de recherche

Le niveau 2 décide de l'affectation de clients à chaque dépôt sélectionné. Les essais à ce niveau sont paramétrés directement par les solutions provenant du niveau 1. À ce niveau, le nombre de dimensions de l'espace de recherche est le même que le nombre de clients. Chaque dimension représente un client et prend initialement une valeur aléatoire $L_{2x} \sim U(0,1)$. Une liste triée en ordre ascendant du résultat $|(L_{2x} - 2n - 1)/(2y)|$ pour chaque dépôt (n est le numéro de chaque dépôt et y est la quantité totale du dépôt) fournit une liste de priorité. Deux bornes pour chaque dépôt sont appliquées ici. Ces bornes sont $((n - 1)/y, n/y)$ elles correspondent à une allocation égalisée en fonction de nombre de dépôt ouvert. La [Figure V-5](#) représente un exemple avec 5 clients et trois dépôts. Donc L_{21} est affectée au premier dépôt, L_{22}, L_{24} et L_{25} au deuxième, et L_{23} au troisième.

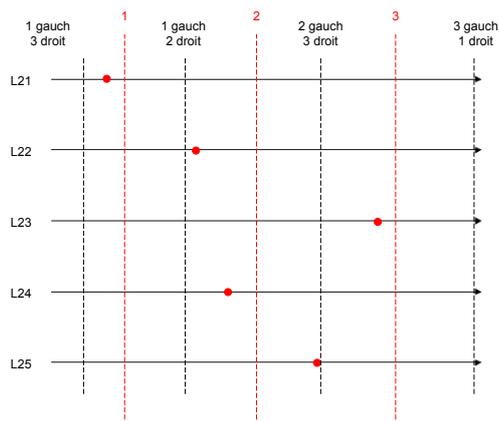


Figure V-5 La projection de l'espace de recherche du niveau 2

Puisque les dépôts ont des contraintes de capacité, certains clients à proximité de la borne ne peuvent pas être attribués à son dépôt initial. Dans ce cas, le processus de la projection inverse de ce niveau vérifie s'il existe des clients non affectés, la borne de chaque dépôt sera élargie progressivement afin d'inclure ces clients à l'intérieur des bornes des autres dépôts encore non saturés. Ce processus s'arrête jusqu'au moment où tous les clients sont affectés. La topologie de chaque dimension est aussi un anneau. La [Figure V-6](#) montre un cas avec une borne élargie.

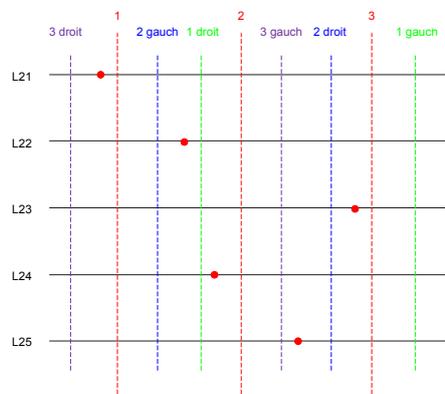


Figure V-6 La projection de l'espace de recherche du niveau 2 avec la borne élargie

V-1.2.1.3. Niveau 3 –la projection de l'espace de recherche

Le niveau 3 définit le parcours des véhicules. Les essais à ce niveau sont paramétrés selon les solutions correspondantes au niveau 2. À ce niveau, le

nombre de dimensions de l'espace de recherche est également le même que le nombre de clients. Chaque dimension représente un client et prend initialement une valeur aléatoire $L_{3x} \sim U(0,1)$. Une liste triée en ordre ascendant de L_{3x} pour les clients affectés au même dépôt fournit un ordre de clients à visiter. Puisque les véhicules ont aussi des contraintes de capacité, le processus de la projection inverse de ce niveau vérifie la capacité des véhicules et les remplit successivement selon la liste des priorités triées.

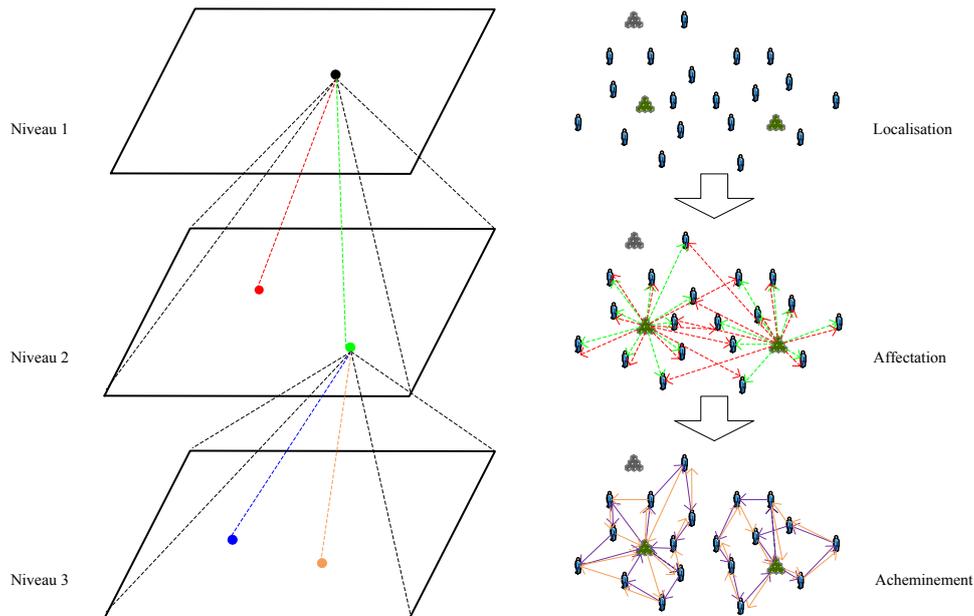


Figure V-7 Schéma de la modélisation du CLRP par la MLPSO à 3 niveaux

La [Figure V-7](#) illustre la modélisation globale du CLRP par la MLPSO à 3 niveaux. Comme nous l'avons dit, chaque particule, sauf celle du niveau le plus bas, génère son propre essaim (l'espace de recherche) du niveau au-dessous. Ainsi, il existe pour un niveau donné autant des essais parallèles que le nombre des particules de son niveau « mère ».

V-1.2.2. Analyse des résultats

La résolution de l'ensemble des instances de CLRP utilise toujours les mêmes paramètres afin de se positionner exclusivement sur le processus de benchmark. Le [Tableau V-3](#) montre les paramètres utilisés. Indépendamment,

chaque niveau est constitué d'un petit essaim de PSO, mais le produit scalaire des essais sur les trois niveaux atteint presque une centaine milliards de solutions qui peuvent être générées et évaluées. Compte tenu de la taille importante de l'espace de recherche globale, un compromis entre le temps de résolution et les performances de recherche est nécessaire.

Tableau V-3 Paramètres du CLRP solveur

niveau 1	<i>nombre de particules</i>	28
	<i>nombre de générations</i>	10
niveau 2	<i>nombre de particules</i>	200
	<i>nombre max de générations</i>	120
niveau 3	<i>nombre de particules</i>	200
	<i>nombre max de générations</i>	120
PSO	<i>c1</i>	1.4962
	<i>c2</i>	1.4962
	<i>ωi</i>	0.7968
	<i>ωf</i>	0.7968
Critère d'arrêt dynamique	<i>min génération de convergence</i>	10
	<i>compteur de critère d'arrêt dynamique</i>	3

La [Figure V-8](#) et la [Figure V-9](#) montrent respectivement les résultats expérimentaux des instances 50-5-1b (50 clients et 5 dépôts candidats) et 200-10-2 (200 clients et 10 dépôts candidats).

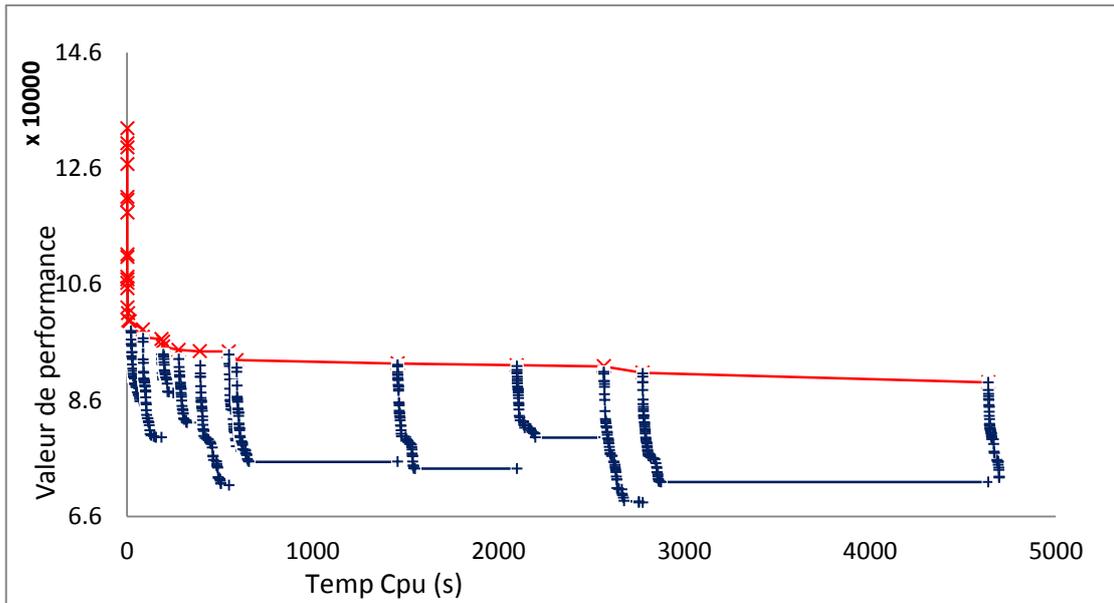


Figure V-8 Les résultats expérimentaux de l'instance 50-5-1b

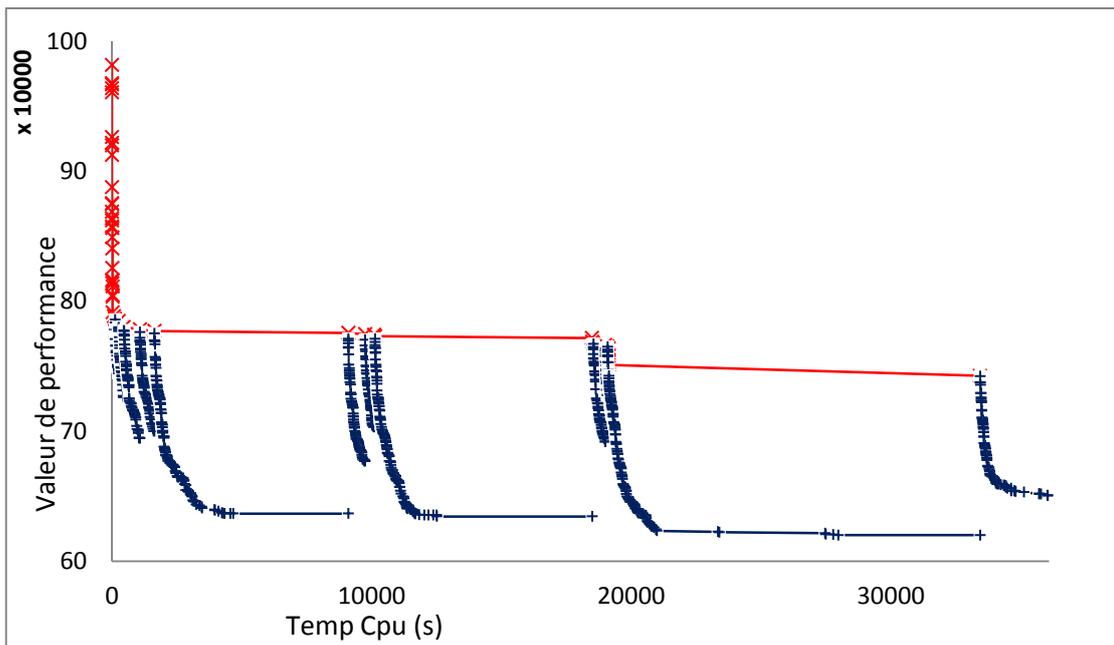


Figure V-9 Les résultats expérimentaux de l'instance 200-10-2

La courbe rouge avec le symbole « x » est générée par les sessions du MLPSO et les courbes bleues avec le symbole « + » sont générées par la session de l'accélérateur de convergence. Ces courbes ont toute une forte baisse à la phase

initiale, jusqu'au point d'inflexion. La linéarité est plus visible sur la courbe rouge de l'instance 50-5-1b que sur celle de l'instance 200-10-2 qui est, visuellement, comprimé car sa plage de temps est plus grande. Par conséquent, celle-ci ressemble à deux lignes perpendiculaires. En effet, la session de l'accélérateur de convergence a une activation retardée et il est déclenché par le point d'inflexion. Les courbes qui sont générées par les sessions du MLPSO s'aplatissent beaucoup après la phase initiale. Occasionnellement les sessions du MLPSO arrivent à encore améliorer la solution trouvée comme pour le cas de l'instance 200-10-2 au bout de 20 000 secondes. En tenant compte du facteur du paramètre relativement « léger » sur la taille des essais, les sessions du MLPSO assument un rôle d'explorateur de l'espace de recherche. L'amélioration de la solution dans cette phase, très stable, est beaucoup moins fréquente mais cela guide la session de l'accélérateur de convergence pour le redémarrage de la recherche locale. Ce qui est le cas dans les deux exemples illustrés ([Figure V-8](#) et [Figure V-9](#)), la meilleure solution trouvée est effectivement basée sur la nouvelle solution trouvée par les sessions du MLPSO dans la phase stable.

Presqu'à chaque fois qu'une nouvelle amélioration est trouvée par les sessions du MLPSO, une courbe descendante liée à l'accélérateur de convergence apparaît. Ces courbes ont une convergence plus efficace car l'accélérateur utilise la dernière solution comme solution initiale. Comme nous pouvons le constater, l'accélérateur de convergence améliore indépendamment la nouvelle solution de *gbest* trouvée par les sessions du MLPSO. En outre, la meilleure solution n'apparaît pas nécessairement à la fin de la courbe. Pendant ce temps, la courbe qui présente la meilleure solution à une forme plus proche de l'asymptote qu'une courbe fortement descendante. Par conséquent, nous pouvons constater que la combinaison des sessions du MLPSO et la session d'accélérateur de convergence aide à l'amélioration de la performance de la MLPSO même en n'utilisant que les paramètres des essais de petite taille. Le [Tableau V-4](#) montre la synthèse des 30 instances issues de la littérature.

Tableau V-4 Résultats de CLRP

instance	MLPSO		Référence			gap +	gap -
	fitness	Cpu(s)	ref +	ref -	Cpu(s)		
20-5-1	56131	90.25	55021	66062	0.13	1.98%	-17.69%
20-5-1b	39693	67.02	39104	62694	0.38	1.48%	-57.95%
20-5-2	49543	203.92	49668	71806	0.13	-0.25%	-44.94%
20-5-2b	39552	196.71	37542	57104	0.38	5.08%	-44.38%
50-5-1	98534	483.68	98079	124247	4.96	0.46%	-26.10%
50-5-1b	66422	551.28	64499	96232	9.63	2.90%	-44.88%
50-5-2	94204	419.42	90188	112711	4.96	4.26%	-19.65%
50-5-2b	75798	407.50	60958	84735	9.63	19.58%	-11.79%
50-5-2bis	90990	47.55	84556	116981	9.63	7.07%	-28.56%
50-5-2bbis	55227	2296.16	51883	82094	9.63	6.06%	-48.65%
50-5-3	96740	17.42	96401	119767	4.96	0.35%	-23.80%
50-5-3b	67891	413.31	61884	97300	9.63	8.85%	-43.32%
100-5-1	334144	235.20	284613	356410	61.68	14.82%	-6.66%
100-5-1b	242551	2307.82	218052	264948	97.35	10.10%	-9.23%
100-5-2	217006	1635.56	197800	233275	61.68	8.85%	-7.50%
100-5-2b	180214	480.55	158514	185973	97.35	12.04%	-3.20%
100-5-3	229036	2022.61	204906	316635	61.68	10.54%	-38.25%
100-5-3b	187605	689.93	155865	247860	97.35	16.92%	-32.12%
100-10-1	362575	149.58	323438	372005	170.66	10.79%	-2.60%
100-10-1b	284010	3461.55	244408	323626	184.33	13.94%	-13.95%
100-10-2	314324	1833.23	286582	337680	170.66	8.83%	-7.43%
100-10-2b	248701	969.09	246109	279615	184.33	1.04%	-12.43%
100-10-3	284921	949.79	257932	300910	170.66	9.47%	-5.61%
100-10-3b	242535	545.87	209339	242659	184.33	13.69%	-0.05%
200-10-1	611627	3085.15	519781	612715	1369.5	15.02%	-0.18%
200-10-1b	490524	6964.12	402097	497591	2992.6	18.03%	-1.44%
200-10-2	619980	5599.01	551914	758484	1369.5	10.98%	-22.34%
200-10-2b	525794	5453.35	388975	614686	2992.6	26.02%	-16.91%
200-10-3	594842	7264.98	480419	652847	1369.5	19.24%	-9.75%
200-10-3b	402314	5468.50	365021	547199	2992.6	9.27%	-36.01%

Les travaux de recherche de référence (Prins et al., 2004) ont proposé un benchmark de 5 heuristiques. La quatrième et la cinquième colonne du Tableau V-4 listent respectivement les meilleurs et les pires résultats de ces 5 heuristiques, sachant que ces résultats ne sont pas toujours liés à la même heuristique. Les deux dernières colonnes donnent l'écart relatif par rapport à la meilleure et la pire

référence. Il montre que le solveur MLPSO a des écarts positifs vis-à-vis des heuristiques, mais domine systématiquement les heuristiques les moins performantes. En général, une bonne performance est réalisée sur les petites instances et certaines instances plus importantes. Globalement, il existe quelques différences par rapport aux meilleurs résultats de référence, mais ces écarts sont toujours dans une limite acceptable, d'autant plus que la MLPSO utilise en fait le même ensemble de paramètres pour toutes les instances. Ce qui n'est pas le cas pour les autres approches. En termes de temps de résolution, l'exécution du MLPSO est beaucoup plus longue que la référence (citer ici les colonnes time(s)). Cela est dû au fait que le travail de référence a utilisé les algorithmes constructifs.

Ces benchmarks nous ont permis à démontrer l'avantage du MLPSO pour sa généralité et sa simplicité de modélisation pour les problèmes d'optimisation multi-niveaux. En termes de la qualité de solution, la MLPSO maintient un écart acceptable par rapport aux heuristiques, et parfois arrive à les dominer pour les problèmes de petite taille. Compte tenu des facteurs sur la généralité de modélisation, la qualité de solution et le temps de résolution, il paraît que la MLPSO se positionne entre les méthodes exactes et les heuristiques. Sachant que les méta-heuristiques pures restent assez difficiles à utiliser pour traiter les problèmes d'optimisation multi-niveaux. Selon les résultats des benchmarks réalisés, nous pouvons constater que la MLPSO est caractérisé, à la fois, de la généralité de modélisation par rapport aux heuristiques, et aussi de sa performance de résolution par rapport aux méthodes exactes

V-2. Analyses du MLPSO

La structure multi-niveaux de la méthode la MLPSO est conçue pour adapter le modèle de résolution à la nature du problème d'optimisation multi-niveau. Le problème d'optimisation multi-niveaux représente les caractéristiques de telles façons que la solution du niveau supérieur domine la formation du problème du niveau inférieur et que l'évaluation de la solution du niveau supérieur nécessite un retour d'information du niveau inférieur. L'existence de ce lien réciproque de causalité fait que la structure du problème d'optimisation multi-niveaux est presque un paradoxe. À cet égard la MLPSO propose à la fois la génération directe de l'arbre de décision et la convergence inverse des mécanismes d'évaluation. Cette hypothèse fondamentale reste à valider dans un premier temps en faisant la vérification sur la contribution de la structure multi-

niveaux par rapport au mono-niveau. Ensuite, la robustesse de la méthode de la MLPSO sur l'évolution du paramètre est étudiée afin de vérifier l'effectivité de la convergence globale au travers de la structure multi-niveaux.

V-2.1.PSO (mono-niveau) vs. PSO (multi-niveaux)

Nous cherchons à confirmer l'intérêt de l'établissement d'un modèle de résolution exploitant la structure multi-niveaux des sous-problèmes. Pour comparer une approche intégrée par rapport à la structure multi-niveaux, la méthode de la projection mono-niveau de la PSO est identique à celle du multi-niveau. Sauf qu'un seul espace de solutions est modélisé pour la référence. Toutes les dimensions de la solution des différents niveaux sont intégrées de façon parallèle dans ce seul espace de solution. Ces dimensions évoluent synchroniquement d'une génération à l'autre.

Le même problème de CLRP est appliqué ici, la méthode de la projection est réutilisée, le nombre de dimension de l'espace de recherche est donc $x + 2y$, où x est le nombre de candidatures de dépôt et y est le nombre de clients à servir, comme illustré dans la [Figure V-10](#).

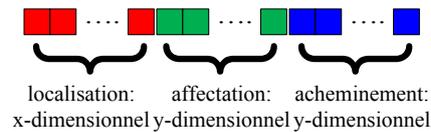


Figure V-10 L'espace de recherche $(x+2y)$ dimensionnel

Nous avons raison de croire que, quand plusieurs dimensions, avec des relations d'inclusion, évoluent en même temps, la convergence se forme difficilement. Le feed-back apporté par chaque évaluation doit normalement guider l'évolution de la nouvelle génération de solution. Pourtant quand les dimensions des solutions du sous-problème supérieur évoluent par ce guidage, les dimensions des solutions du sous-problème inférieur évoluent en parallèle mais en suivant un guidage structuré par la solution du sous-problème supérieur antérieur. Il y a donc un décalage entre les deux phases de décisions. Cette incohérence informationnelle dans le processus d'interaction des sous-problèmes perturbe le feed-back nécessaire à la formation de la convergence.

Le [Tableau V-5](#) montre les paramètres de la PSO mono-niveau. Comme celui du MLPSO, ce benchmark a aussi utilisé des paramètres identiques. Comme il n'existe qu'un seul niveau, le nombre de particules et de générations ont été augmentés pour équilibrer globalement leur quantité de calculs.

Tableau V-5 Paramètres du CLRP solveur pour PSO mono-niveau

Niveau unique	<i>nombre de particules</i>	20000
	<i>nombre max de générations</i>	100000
PSO	<i>c1</i>	1.4962
	<i>c2</i>	1.4962
	<i>ωi</i>	0.7968
	<i>ωf</i>	0.7968

Le [Tableau V-6](#) synthétise les résultats des benchmarks pour les 30 instances de CLRP. Ce résultat montre qu'il existe en moyenne d'écart 22 % par rapport au MLPSO. Avec au minimum un écart de 10 %, cela confirme l'intérêt de cette approche. La diminution du temps de résolution est en effet la preuve de la convergence trop rapide de la PSO mono-niveau, sachant que le solveur de la PSO mono-niveau est paramétré à avoir une équilibre sur l'espace exploité que celle du MPLSO. Tandis que 2 milliards de solutions sont générées et évaluées par la PSO mono-niveau, une centaine milliards de solutions sont mise en œuvre dans le cas du MLPSO. Cela ne montre pas vraiment que le paramétrage a affaibli le résultat de PSO mono-niveau, mais montre plutôt qu'une sensibilité importante conduit à une convergence trop précoce. Après une convergence rapide au début de la résolution, la PSO ne génère plus les solutions améliorées dans le reste du temps de résolution, même avec un paramétrage permettant théoriquement une recherche plus étendue. Par conséquent, nous pouvons constater qu'avec le même algorithme primitif et la même méthode de la projection, l'écart entre PSO mono-niveau et MLPSO reste très important.

Tableau V-6 Résultats de tests entre PSO mono-niveau et multi-niveaux

instance	mono-niveau	Cpu(s)	multi-niveaux	gap
20-5-1	77318	244.39	56131	27.40%
20-5-1b	47593	292.13	39693	16.60%
20-5-2	66516	343.25	49543	25.52%
20-5-2b	45705	305.98	39552	13.46%
50-5-1	157900	431.6	98534	37.60%
50-5-1b	103932	394.96	66422	36.09%
50-5-2	145711	730.24	94204	35.35%
50-5-2b	99775	645.18	75798	24.03%
50-5-2bis	127769	733.12	90990	28.79%
50-5-2bbis	78274	1005.4	55227	29.44%
50-5-3	123939	604.29	96740	21.95%
50-5-3b	87737	716.89	67891	22.62%
100-5-1	443901	1082.7	334144	24.73%
100-5-1b	318966	941.98	242551	23.96%
100-5-2	319199	1308.9	217006	32.02%
100-5-2b	224299	1352.6	180214	19.65%
100-5-3	296681	1347.9	229036	22.80%
100-5-3b	219384	1376.8	187605	14.49%
100-10-1	452063	3382	362575	19.80%
100-10-1b	345286	4108	284010	17.75%
100-10-2	366225	5072.7	314324	14.17%
100-10-2b	279452	2350.8	248701	11.00%
100-10-3	342502	6398.2	284921	16.81%
100-10-3b	271898	2300.2	242535	10.80%
200-10-1	855705	4855.9	611627	28.52%
200-10-1b	620481	4736.4	490524	20.94%
200-10-2	690642	8813.1	619980	10.23%
200-10-2b	587289	6863.4	525794	10.47%
200-10-3	696431	4991.3	594842	14.59%
200-10-3b	473316	5058.1	402314	15.00%

V-2.2. Analyse de la robustesse du paramétrage

Une analyse de la robustesse du paramétrage a été réalisée afin de comprendre le comportement de la MLPSO face à différents paramètres et sa robustesse face aux variations de ceux-ci. Les tests sont basés sur une seule

instance avec 7 ensembles de paramètre progressivement augmentés en termes de la taille des essais et du critère d'arrêt. Chaque ensemble de paramètre a été résolu 20 fois. Le module de l'accélérateur de convergence a été, ici, désactivé pendant tous ces tests pour ne pas perturber la recherche locale stochastique.

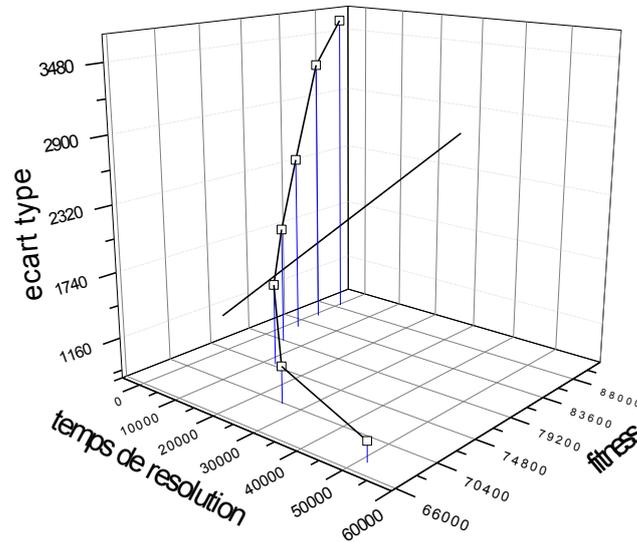


Figure V-11 Robustesse de paramétrage

La [Figure V-11](#) présente les résultats de ces tests. Nous pouvons constater que :

- le temps de résolution monotone augmente en fonction du paramètre de la taille des essais et du critère d'arrêt,
- la qualité de la résolution représentée par la valeur de fitness monotone augmente aussi en fonction du paramètre de la taille des essais et du critère d'arrêt,
- la variation de la qualité de résolution représentée par l'écart type de la valeur de fitness monotone diminue en fonction du paramètre de la taille des essais et du critère d'arrêt.

Cette régularité peut être comprise comme une autre confirmation de la validité de la convergence de la MLPSO. Manifestement l'augmentation du paramètre de l'approche a toujours un effet positif sur la qualité et la robustesse de résolution, ce qui n'est pas le cas pour la PSO mono-niveau.

Cependant beaucoup de tests ont montrés que le paramétrage conduisant un meilleur compromis entre le temps et la qualité de résolution varie d'instance à instance et qu'il est difficile de réaliser une analyse quantitative pour la recherche du paramétrage optimal.

Les deux expérimentations fournissent une analyse sur la méthode de la MLPSO. Comme la MLPSO est la composition d'une méta-heuristique et d'un cadre de résolution à multi-niveaux, la première expérimentation s'est focalisée à la vérification de la contribution cette structure multi-niveaux tout en minimisant l'influence de la partie liée à la méta-heuristique. Après l'obtention d'une confirmation positive, la deuxième expérimentation avait pour l'objectif de vérifier la robustesse de la méthode face aux variations du paramètre de celle-ci. Le résultat ne permet pas de définir un paramétrage optimal pour la méthode puisque le comportement du solveur varie d'une instance à l'autre. Bien que la méthode reste sensible au paramètre, cette expérimentation a confirmé d'un autre côté l'effectivité de la convergence de la méthode. Il est à noter que la formation de la convergence n'est pas liée seulement à la méta-heuristique primitive, le cadre de résolution à multi-niveaux participe également la convergence globale en coordonnant les espaces de recherche dispersés à multiple niveaux.

Conclusion et perspectives

Face à l'évolution constante des contextes socio-économiques, le système de santé recherche en permanence des solutions alternatives pour réduire ses coûts tout en assurant un niveau de qualité et de sécurité de soins satisfaisant. La formation de réseaux pour mutualiser les ressources et les compétences est aujourd'hui apparue dans le secteur de santé comme cela a été le cas dans le secteur industriel, il y a quelques années. Les organisations ont convergées vers une collaboration encore plus complexe et plus étroite. Les décisions faites dans ce contexte de réseau sont souvent corrélées et interdépendantes, que ce soient pour les décisions prises en parallèle par plusieurs centres de décision, ou à travers différents niveaux décisionnels d'une même organisation. La résolution des problèmes d'optimisation multi-niveaux doit s'adapter pour prendre en compte autant que possible les implications liées aux décisions corrélées. C'est aussi la raison pour laquelle le travail de cette thèse s'est élargi, passant de la résolution d'un problème de décision multi-niveaux spécifique, à une approche générique de résolution pour cette classe de problèmes.

La généralisation de la modélisation et la résolution du problème d'optimisation multi-niveaux est un sujet de recherche complexe. Sachant que les approches spécifiques développées ne garantissent pas une polyvalence permettant une adaptation à d'autres problèmes, et que le cadre de résolution a aussi une grande importance dans la résolution du problème, nous avons développé dans ce travail, un cadre de procédures récursives pour répondre à ce sujet de recherche. La structure hiérarchique du MLPSO peut s'adapter à une topologie de décisions multi-niveaux que nous désignons sous le terme de « sous-structure optimale feedback ». Elle est caractérisée par le fait que la solution partielle du niveau supérieur cadre le problème du niveau inférieur et que l'évaluation de la solution du niveau supérieur demande un retour informationnel du niveau inférieur. Comparativement aux approches heuristiques qui englobent les problèmes multi-niveaux par des techniques de modélisation sophistiquées et dédiées au problème, et aux approches hybrides qui résolvent successivement les sous-problèmes en ajoutant un estimateur spécialement défini entre niveaux, la MLPSO a adopté une voie de compromis. Le problème d'optimisation multi-niveaux est décomposé pour garder la capacité de modélisation avec des méta-heuristiques. En outre, un mécanisme d'échange d'information inter-niveaux indépendamment du problème traité a été conçu. Sur la base de la méta-

heuristique PSO, MLPSO propose un cadre multi-niveaux pour transmettre une dynamique de convergence entre essaims de particules hétérogènes ou homogènes afin de s'adapter à divers problèmes d'optimisation multi-niveaux, tout en obtenant des performances calculatoires et une qualité de solution comparables aux algorithmes ad hoc.

Ce travail de thèse a conduit une première expérimentation dans laquelle nous appliquons MLPSO à deux problèmes multi-niveaux complètement différents afin de démontrer le caractère générique de la MLPSO et de tester l'efficacité de convergence inter-essaim. La restriction de la MLPSO original est liée à la croissance exponentielle de la complexité de calcul provoquée par l'empilage de plusieurs niveaux de l'espace de recherche, en particulier pour un modèle avec plus de deux niveaux décisionnels. Cette restriction limite l'instanciation des paramètres de PSO à de faibles valeurs. Cela affecte la performance de la résolution du MLPSO original. Pour compenser cette imperfection, trois modules d'amélioration de performance ont été proposés. Une expérimentation en a confirmé leur intérêt. Afin de préserver la caractéristique de la généralité, ces trois modules sont quasiment transparents dans la gestion des problèmes.

Les futures recherches consistent à explorer la méthode suivant deux pistes : l'amélioration sur la performance de la méta-heuristique et le développement du cadre de résolution.

Comme PSO est une méta-heuristique bien exploitée, de nombreuses variantes existantes peuvent apporter des améliorations potentielles à MLPSO, tels que la mise en œuvre de la structure de voisinage pour les particules, le paramétrage adaptative, etc.

En termes de développement du cadre de résolution, un nouveau mécanisme d'évaluation du sous-problème plus adaptative pourrait être intégré. Il est également envisagé de fournir des caractéristiques distinctes permettant à un seul sous-problème ou à un groupe de sous-problèmes d'être évalués avec pour chacun une fonction objective indépendante. De cette façon, la résolution d'un problème d'optimisation multi-niveaux et multi-objectif serait possible avec MLPSO par l'évaluation des différentes combinaisons de sous-problèmes en utilisant leurs propres fonctions objectives. Cette conception est une

superstructure de la MLPSO original. Chaque borne de la fonction objective individuelle est une application MLPSO indépendante, et les mécanismes d'échange d'information seraient les mêmes de ceux de la MLPSO original.

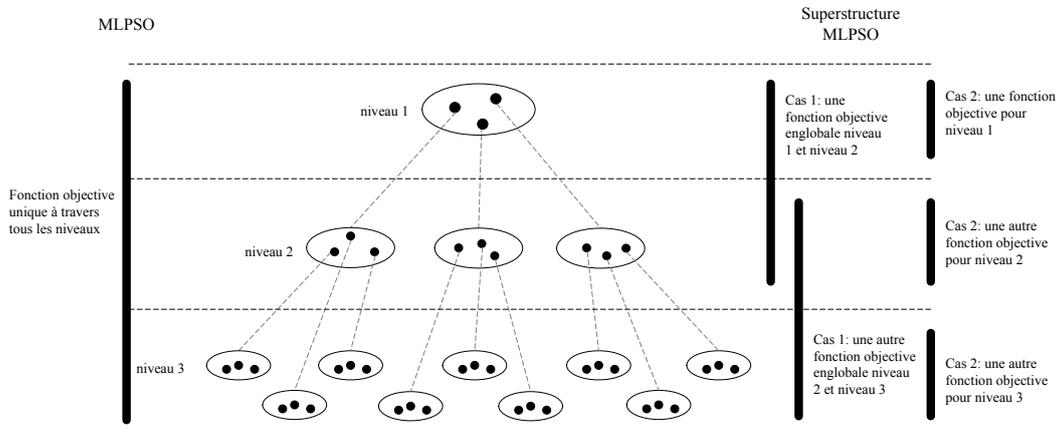


Figure VI-12 Schéma de la superstructure MLPSO

Une superstructure MLPSO offrira la possibilité d'évaluer les sous-problèmes partiellement regroupés ou même individuellement présents en utilisant les fonctions objectives indépendantes. Comme mentionné précédemment, MLPSO utilise une fonction objective unique pour l'évaluation intégralement les sous-problèmes de tous les niveaux. Ce modèle classique définit une seule fonction objective dans laquelle les variables de décision sont distribués sur tous les sous-problèmes connexes. Si, dans un problème d'optimisation multi-niveaux, les sous-problèmes connexes ont leur propre évaluation objective qui ne peut pas être naturellement intégré dans une seule fonction objective, alors la MLPSO original sera incapable de le gérer. Par conséquent, une superstructure MLPSO fournira cette possibilité de construire librement la combinaison de l'évaluation des sous-problèmes, comme illustré par la [Figure VI-1](#).

Dans une superstructure MLPSO, l'évaluation des objectives peut être formée par plusieurs sous-groupes des sous-problèmes connexes, comme le cas 1 de la [Figure VI-1](#), ou être évaluée individuellement comme le cas 2. En comparant avec la MLPSO original, seule la procédure sur la propagation de la valeur de performance est modifiée. Pour le cas du MLPSO, l'évaluation est simplement exécutée dans le problème de niveau le plus bas et ensuite agrégée et remontée jusqu'au niveau le plus haut. Avec cette variante, cette propagation reste dans la

borne de chaque fonction objective. Il n'est pas difficile de découvrir que, cette variante est une superstructure de la MLPSO original. Chaque borne de la fonction objective individuelle est en fait une application MLPSO indépendante, et les mécanismes d'échanges sont les mêmes que ceux du MLPSO. Cette similarité de la structure globale et la structure interne fait rappeler la conception de fractales et la procédure récursive. Il est envisageable que, en tant que superstructure, la convergence du MLPSO restera effective sur cette variante.

Avec l'approche MLPSO, de nombreuses applications dans différents domaines peuvent être envisagées, à condition que la sous-structure optimale feedback soit présente dans le problème à traiter. Nous pourrions donc nous intéresser au problème de gestion de bloc opératoire comme ceux traités dans (Ma et Demeulemeester, 2013; Testi et al., 2007). Il s'agit alors de mieux gérer les interactions entre les décisions de dimensionnement, d'affectation des opérations et d'ordonnancement des opérations. Ces interactions peuvent être gérées intégralement par la MLPSO, qui permet par rapport aux références, l'automatisation des boucles alimentant les niveaux inférieurs et le feedback des évaluations. D'autres applications dans le domaine industriel pourraient être la gestion du couplage entre la planification de production et la gestion logistique. Cela implique à la fois la structure décisionnelle et la typologie organisationnelle constituant différents décideurs.

Références

Adulyasak, Y., Cordeau, J.F. & Jans, R. (2015). The production routing problem: A review of formulations and solution algorithms. *Computers & Operations Research*, 55, p.141–152.

Alba, E., Dorronsoro, B. (2006). Computing nine new best-so-far solutions for Capacitated VRP with a cellular Genetic Algorithm. *Information Processing Letters*, 98 (6): p.225–230.

ANAES (Agence Nationale d'accréditation et d'Evaluation en Santé), (1999). *Principes d'évaluation des réseaux de santé*.

Annaluru, R., Das, S. & Pahwa, A. (2004). Multi-Level Ant Colony Algorithm for Optimal Placement of Capacitors in Distribution Systems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* IEEE Transactions on Evolutionary Computation CEC 2004, 2, p.1932-1937.

Arenas, A.M., Monteiro, T., Verjan, C., & Ruiz, A. (2011). Approche de résolution distribuée du problème de distribution de soins de santé à domicile. CIGI 2011, Québec, Canada.

Baldacci, R., Toth, P., & Vigo, D. (2010). Exact algorithms for routing problems under vehicle capacity constraints. *Annals of Operations Research*, 175, p.213–245.

Bashyam, T.C. (1996). Competitive capacity expansion under demand uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 95, p.89-114.

Bechar, S., Guinet, A. (2006). Planification des lits d'un établissement de soins. GISEH 2006, Luxembourg ville, p.645-653.

Ben bachouch, R., Guinet, A. & Hajri-Gabouj, S. (2007) Gestion des lits mutualisés d'un établissement hospitalier. 7e Congrès international de génie industriel, juin 2007, Québec, Canada.

Berman, P. (2000). Organization of Ambulatory Health Care Services: A Critical Determinant of Health System Performance. *Bulletin of the World Health Organization*, 78 (6): p.791-802.

Candler, W., Norton, R. (1977). Multi-level programming and development policy. World Bank Staff Working Paper 258. <http://documents.worldbank.org/curated/en/1977/05/1555169/multi-level-programming-development-policy>

Candler, W., Townsley, R. (1982). A linear two-level programming problem. *Computers and Operations Research*, 9, p.59-76.

Carrier, J., Néron, E. (2000). An exact method for solving the Multi-Processor Flow-Shop. *RAIRO-Operations Research*, 34 (1): p.1-25.

Carrabs, F., Cordeau, J.F., & Laporte, G. (2007). Variable neighborhood search for the pickup and delivery traveling salesman problem with LIFO loading. *INFORMS Journal on Computing*, 19, p.618-632.

Çetinkaya, C., Karaoglan, I., Gökçen, H. (2013). Two-stage vehicle routing problem with arc time windows: A mixed integer programming formulation and a heuristic approach, *European Journal of Operational Research*, 230 (3): p.539-550.

Chaabane, S. (2004) *Gestion prédictive des blocs opératoires*. Thèse, INSA de Lyon.

Chen, L., Monteiro, T., Wang, T. & Marcon, E. (2013), Multi-level particle swarm optimization (MLPSO) in shared unitdose drug distribution system, in *IEEE CASE 2013, 9th annual IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, Madison Wisconsin, USA, 17-21 août 2013.

Chen, L., Monteiro, T., Wang, T. & Marcon, E. (2013). Approche intégrée de décisions de configuration et de gestion des opérations dans le domaine de la santé. *Journée STP GDR MACS*, Paris, avril 2014.

Chen, L., Monteiro, T., Wang, T. & Marcon, E. (2013). Multi-level particle swarm optimization (MLPSO) in shared unitdose drug distribution system. *IEEE CASE 2013, 9th annual IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, Madison Wisconsin, USA, 17-21 août 2013.

Chen, L., Wang, T., Monteiro, T. & Marcon, E. (2013). Optimisation multi-niveaux par essaims particulaires récursifs. *JN JD MACS*, Strasbourg, juillet 2013.

Chen, p., Huang, H. & Dong, X. (2010). Iterated variable neighborhood descent algorithm for the capacitated vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 37 (2): p.1620–1627.

Chien, T.W. (1992). Operational estimators for the length of a traveling salesman tour. *Computers & Operations Research*, 19 (6): p.469–478.

Clausen, J. (1999). *Branch and Bound Algorithms - Principles and Examples*.

Cormen, T.H., Leiserson, C.E., Rivest, R.L. & Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms* (3rd ed.). MIT Press.

Costa, A.M., Vargas, P.A., Von Zuben, F.J. & França, P.M. (2002). Makespan minimization on parallel processors: an immune based approach. *Evolutionary Computation*, 1, p.920-925.

Dantzig, G.B., Ramser, J.H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6, p.80–91.

Delaney, T. (1996). EAHP survey of hospital-based pharmaceutical services in Europe – 1995. *Eur Hosp Pharm*, 2 (3): p.92–105.

Delorme, A., Gaudoneix-Taieb, M. & Poisson, N. (2004). Spécialités buvables dans un établissement de soins psychiatriques : vers une amélioration de la qualité de la préparation et de l'administration. *Pharm Hosp*, 39 (158): p.173-180.

Devaney, R.L. (1987). *Introduction to Chaotic Dynamical Systems*. Physics Today.

Dhaenens-Flipo, C. (2000). Spatial decomposition for a multi-facility production and distribution problem. *International Journal of Production Economics*, 64 (1–3): p.177–186.

Dogan, K., Goetschalckx, M. (1999). A Primal Decomposition Method for the Integrated Design of Multi-Period Production-Distribution Systems. *IIE Transactions*, 31, p.1027-1036.

Dogan, K., Goetschalckx, M. (1999). A Primal Decomposition Method for the Integrated Design of Multi-Period Production-Distribution Systems. *IIE Transactions*, 31, p.1027-1036.

Doumeingts, G. (1984). Méthode GRAI, méthode de conception des systèmes en productive. Thèse, Université Bordeaux 1.

DREES (Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques), (2014). Les Comptes nationaux de la Santé 2013.

DREES, (2012). Le panorama des établissements de santé - édition 2012.

Dror, M., Laporte, G., & Louveaux, F. V. (1993). Vehicle routing with stochastic demands and restricted failures. *ZOR-Methods and Models of Operations Research*, 37, p.273–283.

Duckett, S. (2004). *The Australian Healthcare System*. Oxford University Press, South Melbourne.

Duhamel, C., Lacomme, P., Quilliot, A., & Toussaint, H. (2011). A multi-start evolutionary local search for the two-dimensional loading capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 38, p.617–640.

Duvigneau, R. (2007). A multi-level particle swarm optimization strategy for aerodynamic shape optimization. *EUROGEN 2007*, Jyväskylä, Finland.

Engelbrecht, A. (2010). Heterogeneous Particle Swarm Optimization. *Swarm Intelligence of Lecture Notes in Computer Science*, 6234: p.191–202.

Eppen, G., Kipp Martin, R. & Schrage, L. (1989). A Scenario Approach to Capacity Planning. *Operations Research*, 37 (4): p.517-527.

Escobar, J.W., Linfati, R. & Toth, P. (2013). A two-phase hybrid heuristic algorithm for the capacitated location-routing problem. *Computers & Operations Research*, 40 (1): p.70-79.

Euchi, J., Mraïhi, R. (2012). The urban bus routing problem in the Tunisian case by the hybrid artificial ant colony algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2, p.15–24.

Gard, C., Lagrange, F., Jacq, F. (2008) Dossier Automates. *Dialog Hopital*, 8: p.11-3.

Gawande, A. (2009). Getting there from here. *New Yorker magazine*, 26 Jan 2009.

- Gendreau, M., Laporte, G., & Séguin, R. (1996). Stochastic vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 88, p.3–12.
- Gendreau, M., Nossack, J. & Pesch, E. (2015). Mathematical formulations for a 1-full-truckload pickup-and-delivery problem. *European Journal of Operational Research*, 242 (3): p.1008–1016.
- Glover, F., Laguna, M. (1997). *Tabu search*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Goetschalckx, M., Vidal C.V. & Dogan, K. (2002). Modeling and Design of Global Logistics Systems : A Review of Integrated Strategic and Tactical Models and Design Algorithms. *European Journal of Operational Research*, 143, p.1-18.
- Golden, B., Magnanti, T., & Nguyen, H. (1977). Implementing vehicle routing algorithms. *Networks*, 7, p.113-148.
- Gupta, J.N.D., Hariri, A.M.A. & Potts, C.N. (1997). Scheduling a two-stage hybrid flow shop with parallel machines at the first stage. *Annals of Operations Research*, 69 (0): p.171-191.
- Gupta, J.N.D., Tunc, E.A. (1991). Schedules for a two-stage hybrid flowshop with parallel machines at the second stage. *International Journal of Production Research*, 29 (7): p.1489-1502.
- Gupta, J.N.D., Tunc, E.A. (1994). Scheduling a two-stage hybrid flowshop with separable setup and removal times. *European Journal of Operational Research*, 77 (3): p.415-428.
- Gyulai, D., Pfeiffer, A., Sobottka, T. & Váncza, J. (2013). Milkrun Vehicle Routing Approach for Shop-floor Logistics. *Procedia CIRP*, 7, p.127–132.
- Hakimi, L. (1964). Optimun Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph. *Operations Research*, 12, p.450-459.
- Hoogeveen, J., Lenstra, J. & Veltman, B. (1996). Preemptive scheduling in a two-stage multiprocessor flow shop is NP-hard. *European Journal of Operation Research*, 89, p.172-175.

Hoogeveen, J.A., Lenstra, J.K. & Veltman, B. (1996). Preemptive scheduling in a two-stage multiprocessor flow shop is NP-hard. *European Journal of Operational Research*, 89 (1): p.172-175.

Kahraman, C., Engin, O., Kaya, İ. & Elif Öztürk, R. (2010). Multiprocessor task scheduling in multistage hybrid flow-shops: A parallel greedy algorithm approach. *Applied Soft Computing*, 10 (4): p.1293-1300.

Kallehauge, B. (2008). Formulations and exact algorithms for the vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 35, p.2307–2330.

Kennedy, J., Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, 4: p.1942–1948.

Kergosien, Y., Lenté, C, Billaut, J.C. & Perrin, S. (2013). Metaheuristic algorithms for solving two interconnected vehicle routing problems in a hospital complex. *Computers & Operations Research*, 40 (10): p.2508–2518.

Kheniene, F., Bedouch, P., Durand, M., Marie, F., Brudieu, E. & Tournalonias, M. (2008). Impact économique de la mise en place d'un automate de distribution des médicaments dans un service de réanimation. *Annales françaises d'anesthésie et de réanimation*, 27 (3): p.208-215.

Kim, S., Horowitz, I., Young, K. & Buckley, T. (2000). Flexible bed allocation and performance in the intensive care unit. *Journal of operation management*, 18 (4): p.427-443.

Ladany, S., Mehrez, A. (1984). Optimal routing of a single vehicle with loading constraints. *Transportation Planning and Technology*, 8, p.301–306.

Lai, M., Cao, E. (2010). An improved differential evolution algorithm for vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries and time windows. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23 (2): p.188–195.

Laporte, G. (2009). Fifty Years of Vehicle Routing. *Transportation Science*, 43 (4): p.408-416.

Laporte, G., Nobert, Y. & Arpin, D. (1986). An exact algorithm for solving a capacitated location-routing problem. *Annals of Operations Research*, 6 (9): p.291-310.

Legillon, F., Liefoghe, A. & Talbi, E. (2012). CoBRA: A cooperative coevolutionary algorithm for bi-level optimization. *Evolutionary Computation CEC 2012*, Brisbane, Australia.

Lepez, S., Poirier G. & Rengot M. (2004). Prospective et vieillissement de la population dans le Bassin minier : Enjeux territoriaux et santé. *Observatoire régional de la santé Nord-Pas de Calais*, Novembre 2004.

Lin, C., Choy, K.L., Ho, G.T.S., Chung, S.H. & Lam, H.Y. (2014). Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 41, p.1118-1138.

Lin, C.K.Y., Chow, C.K & Chen, A. (2002). A location-routing-loading problem for bill delivery services. *Computers & Industrial Engineering*, 43 (1-2): p.5-25.

Ma, G., Demeulemeester, E. (2013). A multilevel integrative approach to hospital case mix and capacity planning. *Computers & Operations Research*, 40, p.2198-2207.

Makaci, M., Reaidy, P., Evrard-Samuel K., Botta-Genoulaz, V. & Monteiro T. (2014), La mutualisation des entrepôts dans la chaîne logistique : proposition d'un cadre d'analyse. 10èmes Rencontres Internationales de la Recherche en Logistique (RIRL), 20 au 21 mai 2014, Marseille, France.

Manne, A.S. (1961). Capacity expansion and probabilistic growth. *Econometrica*, 29, p.632-649.

Manne, A.S. (1967). Investments for Capacity Expansion: Size, Location and Time- *Econometrica*, 36 (3/4): p.620-622.

Martel, A. (2005). The design of production-distribution networks: A mathematical programming approach. *Supply Chain Optimization*, Kluwer Academic Publishers.

- Mason, R., Lalwani, C., & Boughton, R. (2007). Combining vertical and horizontal collaboration for transport optimisation. *Supply Chain Management: An International Journal*, 12(3): p.187–199.
- Masson, R., Ropke, S., Lehuédé, F. & Péton, O. (2014). A branch-and-cut-and-price approach for the pickup and delivery problem with shuttle routes. *European Journal of Operational Research*, 236 (3): p.849–862.
- Mazier, A. (2010). Optimisation Stochastique pour la gestion des lits d'hospitalisation sous incertitudes. Thèse. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- Mendoza, J.E., Castanier, B., Guéret, C., Medaglia, A.L., & Velasco, N. (2010). A memetic algorithm for the multi-compartment vehicle routing problem with stochastic demands. *Computers & Operations Research*, 37, p.1886–1898.
- Moslehi, G., Khorasanian, D. (2013). A hybrid variable neighborhood search algorithm for solving the limited-buffer permutation flow shop scheduling problem with the makespan criterion. *Computers & Operations Research*, 52, p.260-268.
- Nagy, G., Salhi, S. (2005). Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries. *European Journal of Operational Research*, 162(1): p.126–141.
- Nagy, G., Salhi, S. (2007). Location-routing: Issues, models and methods. *European Journal of Operational Research*, 177 (2): p.649-672.
- Negenman, E.G. (2001). Local search algorithms for the multiprocessor flow shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 128 (1): p.147-158.
- Ngueveu, S.U. (2009). Problèmes de tournées de véhicules avec contraintes particulières pour la maîtrise des risques. Thèse, Université de technologie de Troyes.
- Oğuz, C., Fikret, E.M. (2005). A Genetic Algorithm for Hybrid Flow-Shop Scheduling with Multiprocessor Tasks. *Journal of Scheduling*, 8, p.323–351.

Oğuz, C., Zinder, Y., Do, V.H., Janiak, A. & Lichtenstein, M. (2004). Hybrid flow-shop scheduling problems with multiprocessor task systems. *European Journal of Operational Research*, 152 (1): p.115-131.

Osorio-Montoya, G., Trilling, L., Monteiro, T., Viallon, C. & Albert, F. (2014). Vers une gestion efficiente des établissements et services médico-sociaux: modélisation et suivi des activités. GISEH 2014, Liège, Belgique.

Owen, S., Daskin, M. (1998). Strategic Facility Location: A Review. *European Journal of Operational Research*, 111, p.423-447.

Park, J., Kim, B. (2010). The school bus routing problem: A review. *European Journal of Operational Research*, 202 (2): p.311–319.

Parragh, S.N., Doerner, K.F., & Hartl, R.F. (2008). A survey on pickup and delivery problems. Part I: transportation between customers and depot. *Journal für Betriebswirtschaft*, 58, p.21–51.

Portmann, M.C., Vignier, A., Dardilhac, D. & Dezalay, D. (1998). Branch and bound crossed with GA to solve hybrid flowshops. *European Journal of Operational Research*, 107 (2): p.389-400.

Prins, C., Prodhon, C. & Calvo, R. (2004). Nouveaux algorithmes pour le problème de localisation et routage sous contraintes de capacité. MOSIM'04, Nantes, France, 2004.

Prins, C., Prodhon, C., Ruiz, A., Soriano, P. & Calvo, R.W. (2007). Solving the capacitated location-routing problem by a cooperative Lagrangean relaxation-granular tabu search heuristic. *Transportation Science*, 41 (4): p.470-483.

Prodhon, C. (2006). Le problème de localisation-routage. Thèse, Université de technologie de Troyes.

Rapport final projet HRP2, rapport final thématiques prioritaires 2003-2005.

Rapport final projet HRP3, rapport d'activités sur la période 2005-2009 du laboratoire GIPSA-lab.

Rapport sectoriel - édition 2013, Cliniques et hôpitaux privés au cœur du système de santé, Fédération de l'Hospitalisation privée.

Redjem, R. (2013). Aide à la décision pour la planification des activités et des ressources humaines en hospitalisation à domicile. Thèse, Université de Saint-Etienne.

Rei, W., Gendreau, M., & Soriano, P. (2010). A hybrid Monte Carlo local branching algorithm for the single vehicle routing problem with stochastic demands. *Transportation Science*, 44, p.136–146.

Riane, F., Artiba, A. & Elmaghraby, S.E. (1998). A hybrid three-stage flowshop problem: Efficient heuristics to minimize makespan. *European Journal of Operational Research*, 109 (2): p.321-329.

Riera-Ledesma, J., Salazar-González, J.J. (2013). A column generation approach for a school bus routing problem with resource constraints *Computers & Operations Research*, 40 (2): p.566–583.

Ringold, D., Santell, J., Schneider, P. & Arenberg, S. (1999). ASHP national survey of pharmacy practice in acute care settings: prescribing and transcribing-1998. American Society of Health-System Pharmacists, *American Journal of Health-System Pharmacy*, 56: p.142-157.

Rolland, E., Schilling, D.A. & Current J.R. (1997). An efficient tabu search procedure for the p-Median Problem. *European Journal of Operational Research*, 96 (2): p.329-342.

Russell, R. (1977). An effective heuristic for the M-Tour traveling salesman problem with some side conditions. *Operations Research*, 25, p.517–524.

Salhi, S., Rand, G.K. (1989). The effect of ignoring routes when locating depots. *European Journal of Operational Research*, 39 (2): p.150-156.

Siqueira, E.C., Souza, M.J.F., Souza, S.R., Franca Filho M.F. & Marcelino, C.G. (2013). An algorithm based on Evolution Strategies for makespan minimization in hybrid flexible flowshop scheduling problems. *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Cancún, México.

Solomon, M.M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, 35, p.254–265.

- Song, S.M., Kim, T. (2013). Customer-oriented school bus operations for childcare centers in Korea. *Computers & Industrial Engineering*, 66 (1): p.116–124.
- Srivastava, R. (1993). Alternate solution procedures for the location-routing problem. *Omega*, 21 (4): p.497-506.
- Sultan, A. (1993). *Linear Programming: An introduction with applications* (chapter 9 - transportation and assignment problems. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Taaffea, K., Geunesb, J. & Edwin Romeijn, H. (2010). Supply capacity acquisition and allocation with uncertain customer demands. *European Journal of Operational Research*, 204 (2): p.263–273.
- Tamir, A. (1993). Complexity results for the p-median problem with mutual communication. *Operations Research Letters*, 14, 7984.
- Taylor, J. (2011). *Decision Management System : A practical guide to using business rules and predictive analytics*. IBM Press.
- Testi, A., Tanfani, E. & Torre, G. (2007). A three-phase approach for operating theatre schedules. *Health Care Management Science*, 10, p.163–172.
- Testi, A., Tanfani, E. (2009). Tactical and operational decisions for operating room planning: Efficiency and welfare implications. *Health Care Management Science*, 12 (4): p.363-73.
- Ting, C.J., Chen, C.H. (2013). A multiple ant colony optimization algorithm for the capacitated location routing problem. *International Journal of Production Economics*, 141 (1): p.34-44.
- Trelea, I.C. (2003). The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection. *Information Processing Letters*, 85 (6): p.317-325.
- Trentesaux, D. (2002). *Pilotage hétéroarchique des systèmes de production*. Mémoire d'HDR, Université de Valenciennes.

- Tricoire, F., Doerner, K. F., Hartl, R. F., & Iori, M. (2011). Heuristic and exact algorithm for the multi-pile vehicle routing problem. *OR Spectrum*, 33, p.931–959.
- Tronquoy, P. (2012). La santé, quel bilan ?. *Cahiers français*, n° 369, juillet-août 2012, La Documentation française.
- Waldrop, M.M. (1992). *Complexity – the emerging science at the edge of order and chaos*. New York: Touchstone.
- Wang, S., Liu, M. (2013). A heuristic method for two-stage hybrid flow shop with dedicated machines. *Computers & Operations Research*, 40 (1): p.438-450.
- Wang, T. (2008). *Organisation et pilotage des services sur le trajet des urgences*. Thèse, INSA de Lyon.
- World Health Organization, (2000). *The world health report 2000 : Health systems: improving performance*. Geneva, WHO.
- Wu, T.H., Low, C. & Bai, J.W. (2002). Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems. *Computers & Operations Research*, 29 (10): p.1393-1415.
- Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I. & Xu, Y. (2012). Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 39 (7): p.1419–1431.
- Zachariadis, E.E., Tarantilis, C.D., & Kiranoudis, C.T. (2012). The pallet-packing vehicle routing problem. *Transportation Science*, 46, p.341–358.
- Zhang, R., Song, S. & Wu, C. (2012). A two-stage hybrid particle swarm optimization algorithm for the stochastic job shop scheduling problem. *Knowledge-Based Systems*, 27, p.393-406.

Liste de publications (2012 – 2014)

Conférences internationales :

1. Chen, L., Monteiro, T., Wang, T. & Marcon, E. (2013), Multi-level particle swarm optimization (MLPSO) in shared unitdose drug distribution system, in IEEE CASE 2013, 9th annual IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Madison Wisconsin, USA, 17-21 août 2013.
2. Chen, L., Wang T. & Monteiro, T. (2012), Continual scheduling for managing patient recruitment with multiple services of cancer supportive care, in Proceedings of International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, Québec, Canada, août 2012.

Conférences francophones :

3. Chen, L., Masmoudi, M., Wang T. & Monteiro, T. (2012), Système d'Information d'Aide à la Décision pour le dépistage et la coordination des soins de support en cancérologie, in GISEH12 Gestion et Ingénierie de Systèmes Hospitaliers, Québec, Canada, août 2012.

Conférences nationales :

4. Chen, L., Monteiro, T., Wang, T. & Marcon, E. (2013), Approche intégrée de décisions de configuration et de gestion des opérations dans le domaine de la santé, Journée STP GDR MACS, Paris, avril 2014.
5. Chen, L., Wang, T., Monteiro, T. & Marcon, E. (2013), Optimisation multi-niveaux par essais particuliers récurrents, in JN JD MACS, Strasbourg, juillet 2013.
6. Chen, L., Regnier, V., Monteiro, T., Wang, T. & Chauvin, F. (2012), Système d'aide au dépistage et à la coordination des soins de support en cancérologie, Journée IFRESIS, St Etienne, Novembre 2012.

Liste des figures

Figure I-1 Évolution de la dépense de santé dans le PIB des pays de l'OCDE (DREES, 2014)	14
Figure I-2 Les classements d'agencement (Trentesaux, 2002).....	26
Figure II-1 Cartographie des établissements participants du projet	41
Figure II-2 Processus du circuit des médicaments avant et après le système DDIN mutualisé.....	43
Figure II-3 La convergence de l'approche PSO sur le problème du projet	58
Figure II-4 Q-Q Plot et histogramme des solutions trouvées par l'approche en PSO	59
Figure III-1 Modélisation intégrée du problème multi-niveau	70
Figure III-2 Modélisation parallèle du problème multi-niveau	71
Figure III-3 Modélisation hiérarchisée du problème multi-niveau.....	72
Figure III-4 Grille de la méthode GRAI	73
Figure III-5 Le problème avec sous-structure optimale.....	75
Figure III-6 Sous-structure optimale feedback	77
Figure IV-1 Relation parent-enfant de particules hétérogènes	90
Figure IV-2 Propagation des paramètres et de la valeur de la performance.....	91
Figure IV-3 Logigramme de fonctionnement de la MLPSO	92
Figure IV-4 Illustration d'étape par étape d'une MLPSO à 3 niveaux	93
Figure IV-5 Exemple de multi-sessions MLPSO	98
Figure IV-6 Logigramme de critère d'arrêt dynamique	99
Figure IV-7 Logigramme de l'accélérateur de convergence.....	101
Figure IV-8 Logigramme de mémoire Inter-niveau permanent	103
Figure IV-9 Conception du modèle de données de la version VB + Access.....	105
Figure IV-10 Interface du solveur de la version VB + Access	106
Figure IV-11 Interface de la démonstration de la version VB + Access	107
Figure IV-12 Interface du solveur de la version C#	108
Figure IV-13 Instances de teste 1a, 1b.....	109
Figure IV-14 Instance et solution de teste 2	110

Figure V-1 Exemple du HFSMT	113
Figure V-2 Schéma de la modélisation du HFSMT à 2 étages par la MLPSO à 2 niveaux.....	113
Figure V-3 La projection de l'espace de recherche du niveau universel	114
Figure V-4 La projection de l'espace de recherche du niveau 1	119
Figure V-5 La projection de l'espace de recherche du niveau 2	120
Figure V-6 La projection de l'espace de recherche du niveau 2 avec la borne élargie.....	120
Figure V-7 Schéma de la modélisation du CLRP par la MLPSO à 3 niveaux ...	121
Figure V-8 Les résultats expérimentaux de l'instance 50-5-1b.....	123
Figure V-9 Les résultats expérimentaux de l'instance 200-10-2.....	123
Figure V-10 L'espace de recherche (x+2y) dimensionnel	127
Figure V-11 Robustesse de paramétrage	130
Figure VI-1 Schéma de la superstructure MLPSO	134

Liste des tableaux

Tableau II-1 Caractéristiques du projet de la Mutualité de la Loire	49
Tableau II-2 Différents coûts liées à l'investissement du projet de la Mutualité de la Loire	50
Tableau V-1 Paramètres du solveur HFSMT	115
Tableau V-2 Résultats de HFSMT Benchmark	116
Tableau V-3 Paramètres du CLRP solveur	122
Tableau V-4 Résultats de CLRP	125
Tableau V-5 Paramètres du CLRP solveur pour PSO mono-niveau	128
Tableau V-6 Résultats de tests entre PSO mono-niveau et multi-niveaux	129

Résumé

Le système de santé français est confronté au défi d'augmentation permanente de la demande en soins, sous une forte pression financière. Dans la stratégie nationale de santé, une des grandes orientations est de développer une base de coopération impliquant l'ensemble des acteurs et de leur engagement. Ces enjeux demandent au génie hospitalier de rechercher une efficacité dans une échelle encore plus globale, ce qui demande d'intégrer les problèmes locaux et leurs outils d'optimisation qui présentent en général un haut degré de fragmentation, afin de contribuer à l'amélioration globale du système. Dans ce contexte-là, initié par un projet de conception du système de soins en réseau avec ressource de production mutualisée, nous proposons à travers ce mémoire de thèse une méthode générique pour résoudre le problème d'optimisation multi-niveaux dans lequel les décisions interdépendantes doivent être prises à différents niveaux dans une structure hiérarchique, ou aux étapes successives. Les décisions faites sont souvent corrélées, surtout pour une topologie de décisions enchaînées en hiérarchique que nous définissons sous le terme de « sous-structure optimale feedback ». La résolution de ce type de problème doit s'adapter pour prendre en compte autant que possible les implications liées aux décisions corrélées. La méthode proposée est basée sur la méta-heuristique PSO, elle utilise une procédure récursive pour définir le transfert des paramètres des sous-problèmes descendant et des évaluations ascendant à travers de multiples espaces de recherche, en assurant la cohérence de la convergence du problème global. Les applications et les analyses ont montrées que la méthode est assez générique et capable de produire la performance et la qualité de résolution proche de celles de la littérature.

Mots-clés : optimisation multi-niveaux, optimisation par essaims particuliers, méta-heuristique, approche générique, prise de décisions multi-niveaux, problème de localisation-routage

Abstract

French healthcare system confronts the challenges of permanent increase in demand for healthcare, under heavy financial pressure. In the national healthcare strategy, a key focus is to develop a cooperation framework involving all organizations and units. These challenges require healthcare engineering to find efficiency in a more global scale, which means to integrate local optimization problems and decision tools that have generally a high degree of fragmentation in order to contribute to the overall improvement of the system. In this thesis, initiated by a shared unit-dose drug distribution system design project, a generic method was developed to solve the multi-level optimization problem in which

interdependent decisions are made at different levels in a hierarchical structure, or at successive stages. The decisions made are often correlated, particularly for decisions in hierarchical topologies that we define by the term "optimal substructure with feedback". The resolution of this problem must be adapted to take into account all implications for correlated decisions. The proposed method is based on the meta-heuristic PSO, it uses a recursive procedure to define the top-down transfer of parameters and the bottom-up feedback of fitness through multiple search spaces, and ensures the consistency of global problem convergence. Our applications and analyzes have shown that this method is generic and is able to provide similar resolution performance and quality compared to the literature references.

Keywords : multi-level optimization, particle swarm optimization, meta-heuristic, generic approach, multi-level decision, location-routing problem

Annexes

- Annexe A : Etude sur les systèmes DDIN sur le marché
- Annexe B : Processus de production du système DDIN
- Annexe C : Etude sur l'agencement d'atelier du système DDIN
(couplé avec processus de production)

Annexe A : Etude sur les systèmes DDIN (Dispensation à Délivrance Individuelle et Nominative) sur le marché

Actuellement, il existe sur le marché quatre types d'automates :

- Les automates gérants uniquement les formes orales sèches déconditionnées.
- Les automates gérants uniquement les formes orales liquides déconditionnées (non traités dans ce projet).
- Les automates « tout compris » gérant tout type de forme médicamenteuse.
- Les automates semi-automatiques pour le conditionnement et la préparation des piluliers.

Tableau Récapitulatif des automates de DDIN

	ECO-DEX ACCED	SINTECO ATHENA	SWISSLOG PILLPICK	MACH4 UNIDOSE 500	ROBOTIK TECHNOLOGY 500	ATPrx Automate 3D 384	EURAF SYGIPH 500SL	FRANCEH OPITAL SDU
Gestion des formes orales sèches déconditionnés / vrac	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Gestion des médicaments de toutes formes	Oui	Oui	Oui					Oui
Gestion et découpe des blisters	Oui	Oui	Oui					
Préparation des doses unitaires	Oui	Oui	Oui					
Traçabilité des lots de médicaments	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Préparation de la prescription	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Gestion des retours	Oui	Oui	Oui					Oui
Budget (800 à 1000 lis)	>700k€	>1300k€	>1300k€	130k€	180k€	140k€	190k€	450k€
Cadence de production	1000-3000	800	600-650	3600	4200	3600	3000	6000

Comme nous pouvons voir dans le tableau ci-dessus, le prix des automates dépend des fonctions fournies par ceux-ci. SWISSLOG, SINTECO et ECO-DEX présentent une solution complète de la dispensation à délivrance individuelle et nominative et de la sécurisation du circuit du médicament. La solution de SINTECO semble plus modulaire et flexible que ses concurrents. Cependant, la solution ECO-DEX (figure ci-dessous) est relativement plus efficace en termes de productivité et moins onéreuse par rapport à ses concurrents. Le prix des automates ROBOTIK TECHNOLOGY, MACH4, ATPrx et EURAF diffèrent suivant la technologie employée.

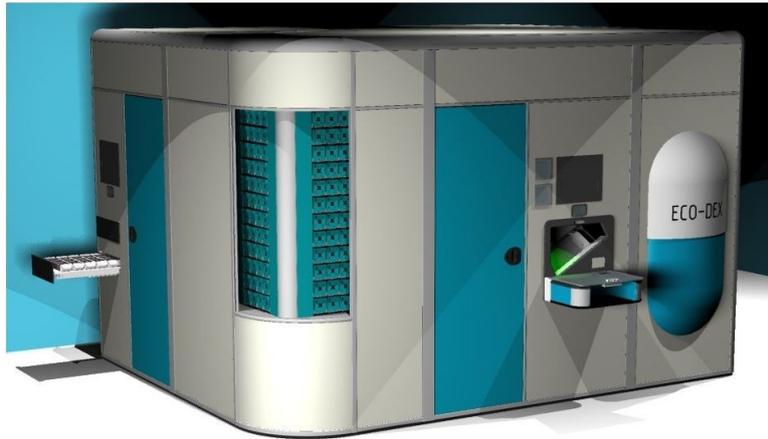
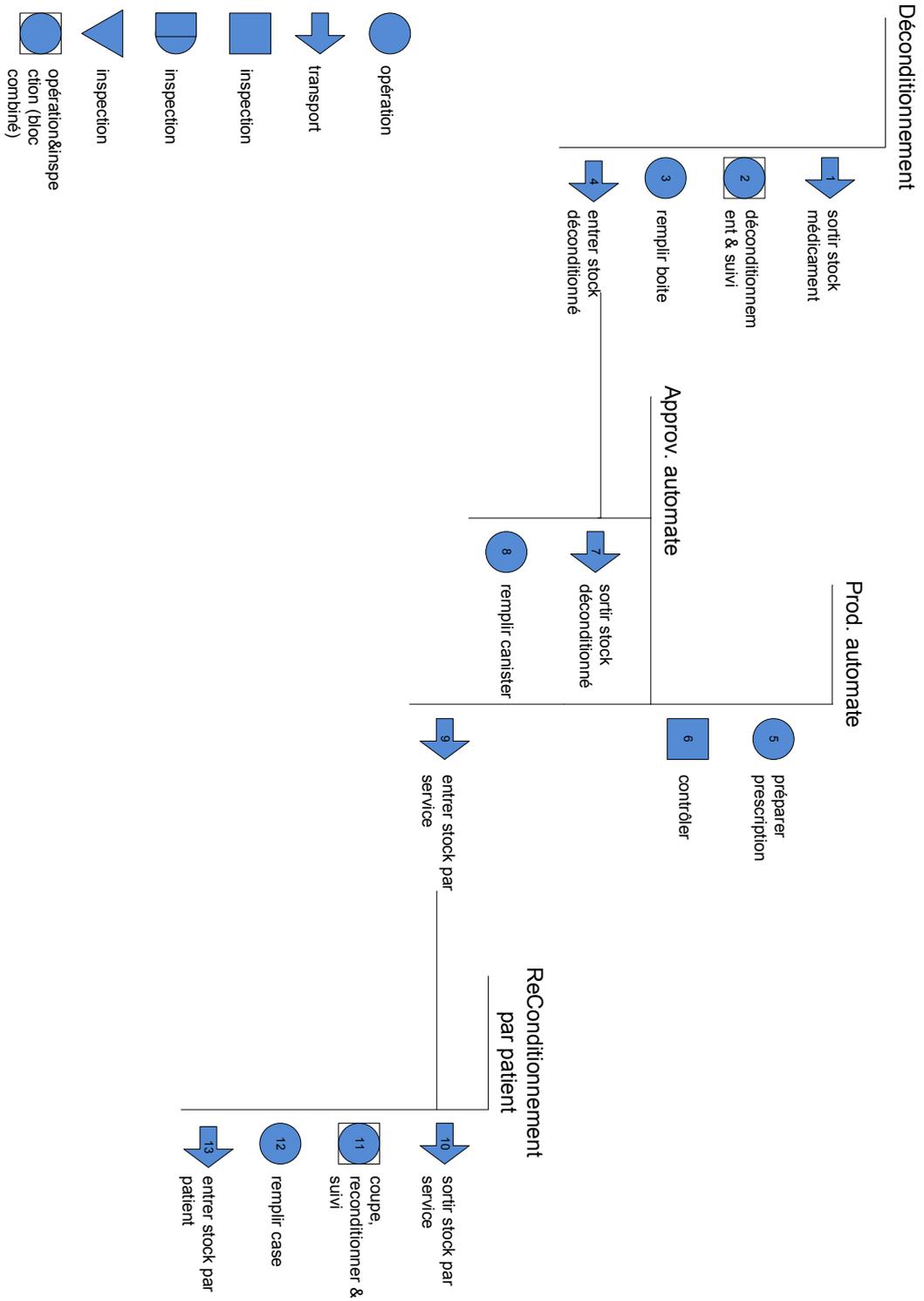


Figure Un automate de DDIN ECO-DEX (source d'image : www.eco-dex.fr)

La solution technologique proposée par EURAF a comme avantage une mise en place des canisters très facile car ils peuvent être placés dans n'importe quel emplacement. Ce système permet un gain de temps important et diminue le risque d'erreurs de manipulation. De plus, des canisters sont accessibles sur les trois faces de l'automate. Ce qui permet un changement de canisters et un nettoyage rapide. Le reste des canisters est rangé dans trois grands tiroirs de stockage. ATPrx (KLS) propose une solution de production complémentaire allant de la vérification des sachets jusqu'à la séparation automatique des sachets patients. De plus, les canisters sont stockés dans de petits tiroirs permettant un accès et un nettoyage plus rapides que les grands tiroirs de stockage de ses concurrents. ROBOTIK TECHNOLOGY propose des emplacements pour canisters accessibles en façade pour insérer des canisters rapidement et faciliter le nettoyage. Le reste des canisters est rangé dans trois grands tiroirs de stockage. L'automate de MACH4 est le plus sommaire. Le rangement des canisters se fait uniquement dans de grands tiroirs de stockage rendant l'accès aux canisters difficile. FRANCEHOPITAL propose une solution semi-automatique qui est assimilable à une station d'assistance de préparation des piluliers.

Ce récapitulatif n'est pas exhaustif. Il existe en effet d'autres fabricants comme MCKESSON et TOSHO. Les stratégies d'implantation ne permettent pas à l'heure actuelle une analyse intéressante.

Annexe B : Processus de production du système DDIN



Annexe C : Etude sur l'agencement d'atelier du système DDIN (couplé avec processus de production)

