

UNIVERSITÉ CLERMONT AUVERGNE
ECOLE DOCTORALE SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES
SPÉCIALITÉ INFORMATIQUE

Hybridations à base de métaheuristique pour les systèmes de production de biens et de services

Présentée par
Nathalie GRANGEON

Soutenue publiquement le 3 juillet 2023

Devant le jury :

Mourad Baiou	LIMOS	Examineur
Jean-Charles Billaut	Université de Tours - LIFAT	Rapporteur
Alexandre Dolgui	IMT Atlantique - LS2N	Rapporteur
Michel Gourgand	LIMOS	Examineur
Christelle Guéret	Université d'Angers - LARIS	Rapporteuse
Sylvie Norre	Université Clermont Auvergne - LIMOS	Référente

Remerciements

Ce document vient ponctuer 25 années de ma vie d'enseignante-chercheuse, vie bien remplie sous tous les angles : enseignement, administratif et recherche. Pendant ces années, l'écosystème a changé, évolué, s'est transformé, mais le plaisir d'imaginer, inventer, créer que procure ce métier est resté immuable.

Été 1997, alors que je m'ennuyais, Michel Gourgand me parle du problème du calcul du makespan dans un Flow-Shop Hybride. Je ne sais toujours pas si c'était vraiment un problème, mais toujours est-il que je le remercie de m'avoir embarquée dans cette aventure. Je lui suis profondément reconnaissante de m'avoir initiée à la recherche au travers du stage de DEA puis encadrée en thèse. Je garderai toujours en mémoire ces réunions de travail dans la bonne humeur et ces moments de franche rigolade en marge des séminaires, conférences et autres moments sérieux.

Dans la liste des personnes à remercier, Sylvie suit de très près pour son « oeuvre complète » que je ne détaillerai pas ici pour ne pas alourdir ce document d'une dizaine de pages. Sa rigueur, son perfectionnisme, ses qualités humaines la rendent unique. Ce manuscrit est une manière de la remercier.

Une bonne partie des travaux présentés dans ce document a été réalisée en collaboration avec Laurent et Sylvie. Nous formons une équipe soudée, un trio de choc, dans lequel nous pouvons compter les uns sur les autres pour avancer malgré les sollicitations extérieures. Je les remercie du fond du cœur pour cela.

Je tiens ensuite à remercier tous les membres de mon jury. En premier lieu, j'adresse mes plus profonds remerciements à mes trois rapporteurs ; Jean-Charles Billaut, Professeur à l'Université de Tours, Alexandre Dolgui, Professeur à l'IMT Atlantique, et Christelle Guéret, Professeure à l'Université d'Angers. Je vous remercie d'avoir pris du temps, sur un emploi du temps que j'imagine chargé, pour lire mon manuscrit et rédiger un rapport. C'est un grand honneur pour moi que vous ayez accepté d'être rapporteur ou rapportrice de mon HDR. Une mention spéciale doit être attribuée à Jean-Charles Billaut qui accomplit ce travail d'évaluation de mes travaux pour la troisième fois.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à Mourad Baiou, directeur du LIMOS, pour s'être libéré durant toute une journée pour participer à ce jury.

J'aimerais aussi adresser mes remerciements à tous les doctorants sans lesquels ce document serait bien vide : Médéric Suon, Virginie André, Fazia Aiboud, Nathalie Klement, Fabrice Gayraud, Arnaud Laurent, Youssef Lahrichi, Raïssa Saleu et Arnauld Tuyaba. Merci pour tous ces moments de recherche partagés, désolée de vous avoir peut-être enquinés par moment.

Un grand merci à « mes garçons » : Laurent, pour les moments de partage professionnel comme personnel et les trajets en voiture agrémentés de pauses mémorables, Joffray, pour le café, la technique et nos discussions sur des sujets divers comme le jardinage et les loisirs créatifs, David, pour me supporter au travail et à la maison (et ce n'est pas une mince affaire).

Pour finir, je remercie mes parents qui m'ont fait tomber dans la marmite de l'informatique dès mon plus jeune âge et qui m'ont toujours soutenue, en toute situation.

Table des matières

I Synthèse des activités	1
1 Curriculum Vitae	3
1.1 Etat civil et situation professionnelle	3
1.2 Formation	4
1.3 Parcours professionnel	4
2 Activités pédagogiques	5
2.1 Enseignements	5
2.2 Encadrement	7
2.3 Innovations pédagogiques	9
3 Activités scientifiques	11
3.1 Encadrements doctoral et scientifique	11
3.2 Publications	16
3.3 Rayonnement scientifique	24
4 Activités administratives	29
4.1 Participation à la vie du département	29
4.2 Responsabilités administratives	30
4.3 Mandats locaux et nationaux	31
4.4 Développement de la formation	32
II Synthèse scientifique	33
1 Synthèse des activités de recherche	35
1.1 Introduction	35
1.2 Métaheuristiques et hybridations	36
1.3 Thématiques principales	42
1.4 Autres travaux	54
1.5 Conclusion	57
Références	61
2 Ordonnancement d'activités dans un environnement multi-sites	65
2.1 Introduction	65
2.2 RCPS et extensions	67
2.3 Ordonnancement d'activités dans une communauté hospitalière	69
2.4 Ordonnancement d'activités de livraison-collecte dans un réseau de soins	77
2.5 Conclusion	83
Références	83

3	Extensions du problème du voyageur de commerce multiple	87
3.1	Introduction	87
3.2	Tournées de véhicules avec contraintes de synchronisation	89
3.3	Livraison urbaine avec drones et véhicules	98
3.4	Conclusion	105
	Références	106
4	Equilibrage et rééquilibrage de lignes d'assemblage	109
4.1	Introduction	109
4.2	Simple Assembly Line Balancing Problem	111
4.3	Parallel Assembly Lines Balancing Problem	117
4.4	Transfert Line Balancing Problem	120
4.5	Problématique industrielle	128
4.6	Conclusion	132
	Références	133
5	Perspectives	137
5.1	Introduction	137
5.2	Des systèmes de production de biens et de services flexibles et durables	138
5.3	Métaheuristiques hybrides	140
5.4	Quelques problématiques	141
5.5	A suivre...	144
	Références	144

Première partie

Synthèse des activités

Chapitre 1

Curriculum Vitae

1.1 Etat civil et situation professionnelle

Nathalie GRANGEON :

Date et Lieu de Naissance 6 juillet 1975 à Désertines (Allier)
Nationalité Française
Situation de famille En couple avec 1 enfant et 1 chat
Situation professionnelle Maître de conférences hors classe (depuis 2018)
 Titulaire de la PEDR (depuis 2019)
Section CNU 27

Enseignante :

Etablissement Université Clermont Auvergne
 (Anciennement Université Blaise Pascal)
 Institut Universitaire de Technologie (IUT) Clermont Auvergne
 (Anciennement IUT d'Allier)
Département Management de la Logistique et des Transports (MLT)
 (Anciennement Gestion Logistique et Transport (GLT))
Adresse Avenue Aristide Briand - CS 82235
 03101 Montluçon
Téléphone 04 70 02 20 82

Chercheuse :

Laboratoire Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes
 LIMOS UMR CNRS 6158
Axe Outils Décisionnels pour la Production et les Services (ODPS)
Adresse Campus Universitaire des Cézeaux
 1 rue de la Chebarde - TSA 60125 - CS 60026
 63178 Aubière cedex
Téléphone 04 73 40 75 97

1.2 Formation

- 1998 - 2001**
Clermont-Ferrand II **Thèse de doctorat** de l'Université Blaise Pascal
 sous la direction de Michel Gourgand et Sylvie Norre
 « *Métaheuristiques et Modèles d'évaluation pour le problème du Flow-Shop Hybride Hiérarchisé : Contexte déterministe et Contexte stochastique* »
 Date de soutenance : 17 décembre 2001
 Mention très honorable
- 1998**
Clermont-Ferrand II **Diplôme d'Etudes Approfondies** de l'Université Blaise Pascal
 Spécialité : Informatique, Productique, Imagerie médicale
 Option : Recherche Opérationnelle et Productique
 Mention assez-bien
- 1997**
Clermont-Ferrand II **Maîtrise** de l'Université Blaise Pascal
 Spécialité : Informatique
 Option : Recherche Opérationnelle
 Mention bien
- 1996**
Clermont-Ferrand II **Licence** de l'Université Blaise Pascal
 Spécialité : Informatique
 Mention bien

1.3 Parcours professionnel

- Depuis février 2007** Maître de conférences à l'Université Clermont Auvergne
 IUT Clermont Auvergne - site de Montluçon
 Département Management de la Logistique et des Transports
- Septembre 2002 - janvier 2007** Maître de conférences à l'Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand II)
 IUT d'Allier - site de Vichy
 Département Métiers du Multimédia et de l'Internet
 (anciennement Service et Réseaux de Communication)
- Septembre 2001 - Août 2002** Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche (1/2 poste)
 INSA de Lyon
 Département Informatique
- Septembre 2000 - Août 2001** Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche (1/2 poste)
 IUT de Montluçon
 Département Gestion Logistique et Transport
- September 1997 - Août 2000** Vacataire
 Université Blaise Pascal, Département de Mathématiques et d'Informatique
 Centre Universitaire des Sciences et Techniques, Génie mathématique et Modélisation
 Centre Clermontois associé au Conservatoire National des Arts et Métiers

Chapitre 2

Activités pédagogiques

C'est grâce à Jeanne-Marie Gourgand que j'ai eu la chance de découvrir, en 1997, l'enseignement en tant qu'étudiante de troisième cycle à l'Université Blaise Pascal. Avec d'autres étudiants en doctorat ou en DEA, nous avons eu la responsabilité des séances de travaux dirigés et de travaux pratiques associées à son cours magistral d'algorithmique et de programmation. Pendant ma thèse de doctorat, j'ai pu poursuivre l'expérience devant des publics très divers : étudiants en DEUG MIAS, Licence d'informatique, Maîtrise d'informatique, élèves en 2^e année d'ingénieur au Centre Universitaire des Sciences et Techniques (CUST), adultes en reprise d'études au Centre Clermontois associé au Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM).

Pendant ma dernière année de doctorat, j'ai obtenu un demi-poste d'Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER) à l'IUT de Montluçon pour enseigner en DUT Gestion Logistique et Transport. En 2001, l'année d'obtention de mon doctorat, j'ai poursuivi mes enseignements dans le cadre d'un demi-poste d'ATER à l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon auprès d'élèves ingénieurs en 4^e année.

Ces multiples expériences d'enseignement m'ont donné envie de poursuivre dans l'Enseignement Supérieur et la Recherche et j'ai obtenu un poste de Maître de Conférences en 2002 à l'IUT d'Allier. J'ai ainsi débuté ma carrière de Maître de Conférences dans le département Services et Réseaux de Communication (devenu Métiers du Multimédia et de l'Internet), localisé à Vichy. En février 2007, j'ai intégré le département Gestion Logistique et Transport (devenu Management de la Logistique et des Transports) de l'IUT d'Allier (devenu IUT Clermont Auvergne), localisé à Montluçon.

Sur le campus de l'IUT, je participe également aux enseignements de la formation d'ingénieur en alternance « GSP » (Génie des Systèmes de Production) portée par le réseau Polytech'Clermont et ouverte en 2008. A l'Université Clermont Auvergne, j'interviens en « Master Génie Industriel, parcours Méthodes avancées de génie industriel » ainsi que dans un module de l'Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur.

2.1 Enseignements

Cette partie présente mes activités d'enseignement depuis 2002, année d'obtention d'un poste de Maître de Conférences. Depuis mon arrivée à l'IUT, je partage les enseignements avec des professionnels, des doctorants ou des collègues de l'IUT, ce qui se traduit par de nombreuses collaborations enrichissantes.

Au département SRC de l'IUT d'Allier (2002-2007)

Le département Services et Réseaux de Communication de l'IUT d'Allier (SRC) devenu Métiers du Multimédia et de l'Internet (MMI) a ouvert en septembre 2001. Je suis donc venue compléter l'équipe du département SRC pour sa deuxième rentrée. A l'époque, le département ne proposait

pas de poursuite d'études en licence professionnelle et l'équipe comprenait un maître de conférences en informatique qui assurait la responsabilité de l'enseignement de l'informatique en 1^{re} année du DUT et j'ai logiquement pris la responsabilité de l'enseignement de l'informatique en 2^e année de DUT SRC.

A ce titre, j'ai mis en place et assuré la responsabilité des enseignements de "Systèmes d'Exploitation UNIX/Linux", "Système d'Information" et "Algorithmique et Programmation Objet". En 1^{re} année, j'ai également pris la responsabilité de l'enseignement des TP de "Systèmes d'Exploitation Windows". Pour d'autres enseignements, j'ai collaboré (coresponsabilité de la rédaction des sujets de TD/TP) avec mon collègue sur les enseignements de 1^{re} année d'"Algorithmique et Programmation", de "Réseaux Locaux" et de 2^e année de "Réseaux Avancés". Ces enseignements se sont transformés au fur et à mesure des évolutions des technologies et des Programmes Pédagogiques Nationaux (PPN). En 2005, j'ai également pris la responsabilité de l'enseignement "Bases de la Programmation Orientée Objets et Événementielle".

Au département MLT de l'IUT Clermont Auvergne (depuis 2007)

Le département Gestion Logistique et Transport de l'IUT Clermont Auvergne a ouvert en septembre 1993. En 2022, il est devenu le département Management de la Logistique et des Transports (MLT). A mon arrivée, le département proposait le DUT GLT et la licence professionnelle «LOGistique et INformatique» créée en 2004. Il comptait une maître de conférences en informatique et un ATER. Je me suis investie dans l'enseignement des techniques de prévision et du tableur Excel en première année, des techniques quantitatives et études de cas en deuxième année et de l'EDI en licence professionnelle.

Au fur et à mesure des évolutions des PPN et du programme de la licence professionnelle, mes enseignements ont évidemment évolué et se situent principalement dans le domaine de la recherche opérationnelle et des outils informatiques en lien avec le système d'information logistique.

Pendant mon mandat de chef de département, pour connaître tous les étudiants du département, je suis intervenue en DUT GLT 1^{re} année en "Outils informatiques de la bureautique" (Coresponsabilité).

A l'Université Clermont Auvergne

J'interviens dans la formation d'ingénieur en alternance Génie des Systèmes de Production (GSP) portée par le réseau Polytech Clermont et ouverte en 2008. En 2008 et 2009, j'ai assuré la coresponsabilité de l'enseignement d'Algorithmique et Programmation en 3^e année. Depuis 2010, je partage l'enseignement de Mathématiques en 5^e année autour de la théorie des graphes et de la programmation linéaire.

J'ai eu l'occasion d'intervenir, de manière ponctuelle, en 2008, en « Gestion de projet » (Responsabilité - PERT et MS-Project), en licence professionnelle Responsable de Projet Maîtrise de l'Énergie et de l'Environnement de l'IUT d'Allier et de 2013 à 2015 en « Modélisation et optimisation de la chaîne logistique » (3h CM) en Master Modèles, Systèmes, Imagerie (MSI) parcours Système de Production (SP) de l'UFR Sciences et Techniques.

Depuis 2014, je suis coresponsable du module « Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire. Evolutions et tendances actuelles » de l'École Doctorale Sciences pour l'Ingénieur. Ce module, à destination de doctorants, a pour objectif de donner une vision globale des métaheuristiques, de la théorie aux aspects algorithmiques, en s'attachant à faire découvrir les avancées récentes des métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire et les défis posés par les systèmes complexes. J'interviens au travers de la présentation d'études de cas issus de mes travaux de recherche ou de la littérature.

Depuis 2022, j'interviens dans le module « Optimisation et aide à la décision » du « Master Génie Industriel, parcours Méthodes avancées de génie industriel ». Pendant 6 heures, je présente les problèmes d'équilibrage de lignes d'assemblage et diverses méthodes d'aide à la décision pour cette classe de problèmes.

Le tableau 2.1 présente une synthèse des enseignements que j'ai assurés ces 5 dernières années. Mon implication dans la réalisation des heures d'enseignement varie, chaque année, en fonction des vacataires et des enseignants contractuels recrutés.

2.2 Encadrement

Aux enseignements traditionnels, s'ajoutent également des missions d'encadrement d'étudiants à l'Université ou en entreprise.

Projet tuteuré

Les projets tuteurés sont des travaux menés pendant une année universitaire par un groupe d'étudiants. Les sujets traités sont très variés, en lien avec un partenaire extérieur à l'IUT ou interne à l'IUT. L'encadrement consiste à aider les étudiants dans leur gestion de projet au travers de comptes-rendus réguliers (oral ou écrit), à éventuellement être à l'interface avec le partenaire et à évaluer le travail réalisé. L'encadrement des projets tuteurés de la licence professionnelle est assuré par les responsables de la licence mais j'interviens ponctuellement pour l'évaluation de présentation orale.

Ma participation aux encadrements est la suivante :

- en DUT SRC : encadrement de 3 à 6 étudiants de première année par an et 3 à 4 étudiants de 2^e année par an.
Exemples de projet : réalisation d'une affiche pour une manifestation, proposition d'un logo et d'une charte graphique pour l'IUT
- en DUT GLT : encadrement de 6 à 8 étudiants de 2^e année par an.
Exemples de projet en lien avec des partenaires extérieurs à l'IUT : bilan de la charte CO2 (avec l'Observatoire Régional des Transports), livraison du dernier kilomètre dans le centre ville de Montluçon (avec la Mairie de Montluçon), mise en place d'outils logistiques (pour l'ASPTT Montluçon Natation Synchronisée), préparation et organisation d'une compétition de drones (avec AeroCezeaux).
Exemples de projet en lien avec le département : animation du département par le BDE, préparation d'une vidéo pour le concours vidéolog.

Avec l'ouverture du BUT MLT, les projets tuteurés ont été remplacés dans les programmes pédagogiques par les Situations d'Apprentissage et d'Evaluation (SAé).

Situation d'Apprentissage et d'Evaluation (SAé)

Mis en place en 2021, avec l'ouverture du BUT et l'approche par compétences, l'objectif est d'amener les étudiants à mobiliser des connaissances pour résoudre des problématiques professionnelles. Je suis responsable de deux SAé : « SAé 1.02 - Etude de l'entrepôt et de la logistique » et « SAé 2.03 - Pilotage d'un processus d'achats et gestion des stocks : réorganisation d'un entrepôt à l'aide de la méthode ABC ». Mon rôle consiste à organiser les différentes activités composant les SAé (placement dans l'emploi du temps, répartition entre temps encadré et temps en autonomie, affectation des intervenants), produire des données ou documents supports, coordonner les corrections des travaux rendus par les étudiants.

Formation	Intitulé du cours	CM	TD	TP
GLT2	Techniques Quantitatives et Recherche Opérationnelle (Problème de plus court chemin, problème de flot, programmation linéaire, dualité, analyse de sensibilité)		17h	12h
	Etudes de cas de transport et logistique (Localisation d'entrepôt, gestion des approvisionnements, réorganisation d'un entrepôt)			20h
GLT2 /MLT2	Systèmes d'information appliqués au système logistique (Flux achat-vente et production sous OpenERP/Odoo)			12h
LP LOGIN	Initiation à l'algorithmique et la programmation en VBA (Variables, Structures conditionnelles, boucles, tableau, application en VBA)	8h	8h	20h
	Etude de cas de tournées de véhicules (Problèmes du voyageur de commerce, du postier chinois, de tournée de véhicules)	3h	7h	10h
	EDI et Traçabilité (Dématérialisation des échanges pour la logistique et le transport, études de cas de traçabilité)	3h	10h30	2h
	Pratique d'un ERP (Flux achat-vente et production sous Sage X3)			20h
	Pratique d'un WMS (Cartographie, Inventaire, Réception, Préparation de commande)			20h
GSP5	Mathématiques - Théorie des graphes (Problèmes d'arbre couvrant de poids minimal, de plus court chemin, du postier chinois, de flot, de voyageur de commerce)	10 h	10h	
Master 2 GI	Optimisation et aide à la décision (Problèmes d'équilibrage de ligne d'assemblage)	2h	4h	
ED SPI	Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire. Evolutions et tendances actuelles (Etudes de cas)	6h		

TABLE 2.1 – Principaux enseignements réalisés ces dernières années

GLT2 = DUT GLT 2^e annéeMLT2 = BUT MLT 2^e année

LP LOGIN = Licence professionnelle Logistique et Système d'Information

GSP5 = Diplôme d'ingénieur Génie des Systèmes de Production 5^e année

Master 2 GI = Master Génie Industriel parc. Méthodes avancées de Génie Industriel

ED SPI = Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur

Etude bibliographique

Depuis 2017, j'encadre 2 étudiants par an pour la réalisation d'études bibliographiques dans le cadre du « Master Génie Industriel, parcours Méthodes avancées de génie industriel ». Mon intervention consiste en la proposition d'un sujet, souvent en lien avec mes thèmes de recherche, l'accompagnement de l'étudiant pour la recherche de documents et la rédaction du rapport puis l'évaluation de celui-ci et de la soutenance.

Stage en entreprise

Le DUT, le BUT et la licence professionnelle sont des formations professionnalisantes qui comportent des stages en entreprise obligatoires : 12 semaines en DUT SRC, 4 semaines en GLT1/MLT1, 8 semaines en MLT2/GLT2 et 16 semaines en LP LOGIN. Le rôle de l'enseignant référent consiste à veiller au contenu de la mission confiée à l'étudiant, à suivre l'avancement du travail en entreprise au travers de points avec l'étudiant et le tuteur entreprise et à évaluer l'étudiant au travers d'un rapport et d'une soutenance. Depuis 2017, un outil de suivi de stage a été mis en place dans l'ENT de l'université pour faciliter le suivi et assurer sa traçabilité.

Pour l'IUT, j'ai suivi des étudiants en stage en :

- DUT SRC : 3 à 4 étudiants de 2^e année par an,
- DUT GLT / BUT MLT : 3 à 4 étudiants de première année par an et 2 à 4 étudiants de 2^e année par an,
- LP LOGIN : 2 étudiants par an.

Depuis 2018, j'interviens dans l'encadrement d'étudiants pendant leur stage de « Master Génie Industriel, parcours Méthodes avancées de génie industriel » d'une durée de 6 mois. J'ai ainsi suivi 3 étudiants sur des sujets portant sur le développement d'outils d'analyse utilisant l'informatique décisionnelle pour le groupe Renault ou le pilotage de la mise en place d'outils d'amélioration continue pour la société Advanced Accelerator Applications œuvrant dans la médecine nucléaire.

Alternance

Les formations du département MLT sont également ouvertes en alternance : de 2011 à 2016 en contrat de professionnalisation puis à partir de 2016 en apprentissage pour la LP LOGIN et en 2016 en contrat de professionnalisation puis à partir de 2017 en apprentissage pour le DUT GLT (2^e année). Le rôle du tuteur académique est similaire au rôle de l'enseignant référent mais demande un suivi sur l'année universitaire avec des points réguliers à chaque retour en formation. Un Livret Electronique d'Apprentissage (LEA), mis en place par le CFA, permet d'assurer la traçabilité du suivi et des échanges avec le tuteur entreprise.

Je suis tuteur académique pour des étudiants :

- en LP LOGIN : 2 à 3 étudiants par an depuis 2011,
- en DUT GLT 2 / BUT MLT 2 : 1 à 2 par an depuis 2017.

2.3 Innovations pédagogiques

Face à l'évolution du public accueilli en IUT et plus généralement à l'Université, la mission d'enseignement demande d'innover pédagogiquement pour amener les étudiants à apprendre autrement et favoriser leur réussite que ce soit pour de l'enseignement en présentiel ou de l'enseignement en distanciel.

Projet Auvergne Alternance d'Excellence (A2Ex)

Le projet Auvergne Alternance d'Excellence A2ex, initié en 2011 conjointement par l'IUT d'Allier et l'IUT d'Auvergne s'est concrétisé par la mise en place en 2017 d'un entrepôt logistique pédagogique sur environ 300m². En tant que membre de l'équipe projet, j'ai participé au suivi budgétaire des achats ainsi qu'à l'installation du matériel et au paramétrage du Warehouse Management System (WMS) (réunion/formation de deux jours tous les deux mois pendant un an).

Projet Soutien à l'Innovation Pédagogique (SIP)

L'utilisation d'un entrepôt en enseignement demande de faire évoluer les pratiques pédagogiques classiques vers une réelle mise en situation des étudiants et une capitalisation a posteriori des connaissances vues sur le terrain. En 2017, j'ai été porteuse d'un projet Soutien à l'Innovation Pédagogique (SIP) dans le cadre d'un appel à projet de l'Université Clermont Auvergne pour lequel l'équipe du département MLT a obtenu 100h eq TD enseignant, 60h d'accompagnement en ingénierie pédagogique et 15h en accompagnement audiovisuel. Ce projet m'a permis de produire 4 activités composées d'une partie théorique et d'une mise en pratique dans l'entrepôt.

Je poursuis ce travail en développant une nouvelle activité par an afin de placer l'entrepôt au cœur de mes enseignements ou en collaboration avec d'autres collègues. Lors des 14^{es} Rencontres de l'AIRL-SCM à Clermont-Ferrand, un atelier « Pédagogie et questions autour de la logistique et du SCM » a été organisé dans l'entrepôt. Cet atelier a été l'occasion de présenter les activités pédagogiques menées autour de l'entrepôt (GRANGEON, SARRAMIA et al. 2022).

Enseignement à distance

Depuis mars 2020, la pandémie de coronavirus a profondément transformé l'enseignement supérieur avec la nécessité d'enseigner à distance. L'utilisation de plateformes Moodle et Teams s'est accrue. Cela s'est traduit par :

- la création de plusieurs parcours d'enseignement en ligne (« Techniques Quantitatives et Recherche Opérationnelle » et « Etudes de cas de transport et logistique » pour les GLT2 et « Mathématiques » pour les GSP5) accompagnées de séances avec Teams,
- la transformation du processus d'évaluation et de suivi des étudiants avec des rendus et des corrections individuelles réguliers,
- la mise en place d'évaluation en ligne pour les enseignements que j'ai pu réaliser en présentiel (« Pratique d'un WMS », « Systèmes d'information appliqués au système logistique »).

Projet Approche Par Compétences (APC)

Avec l'ouverture à la rentrée 2021 du Bachelor Universitaire de Technologie, le passage à l'approche par compétences et à l'évaluation par compétences demande de faire évoluer les pratiques pédagogiques actuelles. Dans ce cadre, en 2021, j'ai été porteur d'un projet Soutien à l'Innovation Pédagogique "Approche par Compétences" bénéficiant de 135h eq TD enseignant et 50h d'accompagnement du Pôle Ingénierie Pédagogique et Production Audiovisuelle (IPPA) de l'Université.

Le but était de concevoir des Situations d'Apprentissage et d'Evaluation alliant les apprentissages critiques et les jeux de rôle dans le contexte de l'entrepôt. En lien avec 2 ingénieurs pédagogiques du Pôle IPPA, j'ai coordonné les productions des collègues du département MLT autour de la création d'une entreprise de prestation logistique, de l'écriture des scénarii pédagogiques et de la production de jeux de données.

Chapitre 3

Activités scientifiques

C'est pendant l'été 1996 que j'ai découvert la recherche lorsque Michel Gourgand m'a proposé de réfléchir à l'algorithme de calcul du makespan dans un Flow-Shop hybride. J'étais loin de me douter que le problème d'ordonnancement du Flow-shop Hybride deviendrait mon sujet de thèse.

Depuis ma nomination, j'appartiens au Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes (LIMOS UMR CNRS 6158). Mes travaux de recherche concernent principalement la proposition de métaheuristiques, de couplages et d'hybridations à base de métaheuristiques pour des problèmes d'optimisation combinatoire dans des systèmes de production de biens et de services. Je m'intéresse plus particulièrement à des problèmes d'ordonnancement de projet dans un environnement multi-sites, des problèmes de tournées de véhicules et des problèmes d'équilibrage de ligne d'assemblage.

Le site Montluçonnais de l'IUT Clermont Auvergne est un site délocalisé de l'IUT, situé à 1h30 de Clermont-Ferrand. A mon arrivée en 2007, au département GLT, le site comptait deux enseignants-chercheurs du LIMOS : Laurent Deroussi et Sylvie Norre. Ma thèse a été co-encadrée par Sylvie Norre et Laurent Deroussi a soutenu en 2022 une thèse intitulée «Heuristiques, métaheuristiques et systèmes de voisinage : application à des problèmes théoriques et industriels de type TSP et ordonnancement». C'est donc tout naturellement que j'ai collaboré avec ces deux collègues. De plus, afin de garder un contact permanent avec notre laboratoire, basé à Clermont-Ferrand, nous nous efforçons de nous rendre un à deux jours par semaine à Clermont-Ferrand.

J'ai co-encadré 8 thèses soutenues et co-encadre actuellement 1 thèse. Mes travaux de recherche ont donné lieu à 7 chapitres d'ouvrage, 15 articles dans des revues internationales avec comité de lecture, 4 articles dans des revues nationales avec comité de lecture. Je suis également co-auteur de 24 conférences internationales et 19 conférences nationales avec comité de lecture et publication des actes sur papier complet.

3.1 Encadrements doctoral et scientifique

Le tableau 3.1 synthétise mon nombre d'encadrements et de co-encadrements.

	Terminés	En-cours
Post-doctorat	1	2
Thèses	8	1
DSR	1	
Master	11	2

TABLE 3.1 – Activités d'encadrement
DSR = Diplôme de Spécialisation par la Recherche

3.1.1 Post-doctorat

Terminé

Patrice Leclaire	de février 2010 à août 2010
Sujet	<i>Problème de placement de mobiliers en bord de ligne d'assemblage</i>
Encadrement	Co-encadrement avec Sylvie Norre 50%
Publication	1 conférence nationale (MOSIM'2008)
Position actuelle	Maître de conférences à SupMeca, Saint Ouen

En cours

Hector Gatt	de juin 2023 à mai 2024
Sujet	<i>Aide à la conception d'une usine du futur (ultra-flexible) : dimensionnement d'une flotte d'AGV</i>
Encadrement	Co-encadrement avec Laurent Deroussi 33% et Sylvie Norre 33%
Financement	Labex IMobS3 - Co-rédaction de la demande de financement dans le cadre du projet OU ² F du Factolab en collaboration avec le groupe Michelin

Youssef Hadhbi	de octobre 2022 à septembre 2024
Sujet	<i>Optimisation de flux de production et d'ordonnancement associé</i>
Encadrement	Co-encadrement avec Laurent Deroussi 33% et Sylvie Norre 33%
Financement	Plan de relance : préservation de l'emploi R&D en collaboration avec l'entreprise Inoprod
Publication	1 conférence internationale (CODIT'2023)

3.1.2 Thèses de doctorat

Terminées

Médéric Suon	de mars 2007 à février 2011
Sujet	<i>Optimisation de la logistique internationale à horizon stratégique. Application à un constructeur automobile</i>
Encadrement	Co-encadrement avec Sylvie Norre 50%
Financement	CIFRE - PSA
Publications	1 conférence internationale (ILS'2010), 3 conférences nationales (MOSIM'2010, JDJN-MACS'2009, ROADEF'2009)
Position actuelle	«IROC Manager» à SLN - Le Nickel, Nouméa, Nouvelle Calédonie

Virginie André	de février 2008 à décembre 2011
Sujet	<i>Problème de livraison-collecte dans un environnement hospitalier : méthodes d'optimisation, modèles de simulation et couplages</i>
Encadrement	Co-encadrement avec Sylvie Norre 50%
Financement	Contrat recherche CHU de Clermont-Ferrand
Publications	2 chapitres d'ouvrage (Hermès, John Wiley & Sons), 3 conférences internationales (IESM'2011, PMS'2010, ORAHS'2007), 5 conférences nationales (MOSIM'2012, JDJN-MACS'2011, GISEH'2010, ROADEF'2010, ROADEF'2009)
Position actuelle	Maître de Conférences à l'IUT de Saint-Nazaire
Fazia Aiboud	de octobre 2009 à décembre 2013
Sujet	<i>Méthodes approchées pour la résolution de problèmes inverses : identification paramétrique et génération de formes</i>
Encadrement	Co-encadrement avec Sylvie Norre 50%
Financement	Conseil Général de l'Allier
Publications	4 conférences internationales (EA'2013, EA'2011, MIC'2011, META'2010), 2 conférences nationales (ROADEF'2013, ROADEF'2011)
Position actuelle	«Test manager» chez STET, Courbevoie
Nathalie Klement	de octobre 2011 à décembre 2014
Sujet	<i>Planification et affectation de ressources dans les réseaux de soin : Analogie avec le problème du bin packing. Proposition de méthodes approchées</i>
Encadrement	Co-encadrement avec Michel Gourgand 50%
Financement	Contrat laboratoire
Publications	1 revue (RAIRO), 3 conférences internationales (HEALTHINF'2017, APMS'2014, HEALTHINF'2014), 3 conférences nationales (ROADEF'2013, ROADEF'2014, ROADEF'2015)
Position actuelle	Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Lille
Fabrice Gayraud	de janvier 2012 à juillet 2015
Sujet	<i>Problème de tournées de véhicules avec contraintes de synchronisation dans le cadre de structures de maintien à domicile</i>
Encadrement	Co-encadrement avec Laurent Deroussi 33%, Sylvie Norre 33%
Financement	Conseil Général de l'Allier
Publications	1 revue (RAIRO), 2 conférences internationales (PMS'2014, HCist'2013), 5 conférences nationales (MOSIM'2014, JDJN-MACS'2013, ROADEF'2013, ROADEF'2014, ROADEF'2015)
Position actuelle	«Ingénieur Supply Chain, Demand Specialist», à Airbus, Toulouse
Arnaud Laurent	de octobre 2013 à novembre 2017
Sujet	<i>Proposition et étude d'une extension du RCPSP pour la Mutualisation entre plusieurs sites : définition, formalisation, méthodes exactes et méta-heuristiques</i>
Encadrement	Co-encadrement avec Laurent Deroussi 33%, Sylvie Norre 33%
Financement	Bourse MENRT
Publications	2 revues (CIE, JESA), 2 conférences internationales (IFAC'2017, CIE'2015), 6 conférences nationales (MOSIM'2014, ROADEF'2014, ROADEF'2015, ROADEF'2016, ROADEF'2017, ROADEF'2018)
Position actuelle	Maître de conférences à l'Université de Nantes

Youssef Lahrichi	de octobre 2017 à janvier 2021
Sujet	<i>Balancing reconfigurable or robotic assembly lines : exact and hybrid methods</i>
Encadrement	Co-encadrement avec Laurent Deroussi 33%, Sylvie Norre 33%
Financement	Allocation doctorale I-Site - Cap 2025 - Systèmes et services intelligents pour la production et les transports
Publications	3 revues (2 IJPR et JoH), 3 conférences internationales (PMS'2020, MIM'2019, EURO'2018), 3 conférences nationales (MOSIM'2020, MOSIM'2018, ROADEF'2019)
Position actuelle	Post-doctorant à l'Université de Strasbourg

Raïssa Mbiadou Saleu	de octobre 2016 à janvier 2021 (avec une interruption pour congé maternité)
Sujet	<i>Optimization of urban deliveries with drones and vehicles in parallel</i>
Encadrement	Co-encadrement avec Laurent Deroussi 25%, Dominique Feillet 25%, Alain Quilliot 25%
Financement	Bourse Laboratoire d'Excellence Mobilité Innovante Imobs3
Publications	2 revues (EJOR et Networks), 2 conférences internationales (VeRoLog'2019, VeRoLog'2017), 2 conférences nationales (ROADEF'2018, ROADEF'2017)
Position actuelle	Gérante d'une micro-entreprise

En cours

Arnauld Tuyaba	à partir du 1 ^{er} octobre 2022
Sujet	<i>Problèmes de conception de réseaux et d'optimisation de tournées autour de la mise en place de circuits courts alimentaires de proximité</i>
Encadrement	Co-encadrement avec Laurent Deroussi 25%, Sylvie Norre 25%, Sophie Rodier 25%
Financement	Conseil Départemental de l'Allier

3.1.3 Stage de Diplôme Spécialisation par la Recherche

Terminé

Julien Chomel	de octobre 2004 à juillet 2005
Sujet	<i>Problème théorique du bin packing 3D : Problèmes industriels et applications</i>
Encadrement	Co-encadrement avec Sylvain Bertel (50%)
Publication	1 conférence (MOSIM'2004)

3.1.4 Stage de master

Terminés

Patrice Leclaire	de février 2005 à juillet 2005
Sujet	<i>Méthodes approchées pour le problème de l'équilibrage de la charge</i>
Encadrement	Co-encadrement avec Michel Gourgand (50%)
Publication	1 revue (IJPR) et 2 conférences nationales (MOSIM'2006, ROADEF'2006)

Arnaud Laurent	de février 2012 à septembre 2012
Sujet	<i>« Problèmes de mutualisation de ressources et de mobilité dans les communautés hospitalières de territoire »</i>
Encadrement	Co-encadrement avec Sylvie Norre 33%, Laurent Deroussi 33%
Financement	Bourse Laboratoire d'Excellence Mobilité Innovante ImobS3

Ayoub Mhellioui	de mars 2019 à septembre 2019
Sujet	<i>Industrial Strategy Designer & Analyst - Worldwide Alliance</i>
Encadrement	100%
Entreprise	Groupe Renault
Mohamed El Garnaji	de mars 2019 à septembre 2019
Sujet	<i>Pilotage de la convergence du temps retouche du véhicule B10 New</i>
Encadrement	100%
Entreprise	Groupe Renault
Mahi Elmahdi	de mars 2020 à septembre 2020
Sujet	<i>Implantation d'un projet 5s et Approches D'amélioration continue</i>
Encadrement	100%
Entreprise	Advanced Accelerator Applications, Novartis
Salma Sabir	de mars 2021 à septembre 2021
Sujet	<i>Mise en place du plan de charge dans l'ERP</i>
Encadrement	100%
Entreprise	RAL Diagnostics
Zakaria Salhi	de mars 2021 à septembre 2021
Sujet	<i>Contribution à l'évolution des systèmes d'informations de l'entreprise : GED et paramétrage de la planification des approvisionnements et de la production</i>
Encadrement	100%
Entreprise	PcPhy
Safa Mrad	de mars 2021 à septembre 2021
Sujet	<i>«Méthodes d'optimisation pour l'équilibrage de lignes d'assemblage de type mixed-model»</i>
Encadrement	Co-encadrement avec Laurent Deroussi 50% - co-rédaction du dossier de demande de financement
Financement	Bourse du Challenge 2 de CAP 2025
Hajar El Idrissi	de mars 2022 à septembre 2022
Sujet	<i>Amélioration du process laminage</i>
Encadrement	100%
Entreprise	Constellium
Youssef Badaoui	de mars 2022 à septembre 2022
Sujet	<i>Mise en place et optimisation d'outil visant à améliorer les performances de l'atelier</i>
Encadrement	100%
Entreprise	Armor SAS
Arnauld Tuyaba	de mars 2022 à septembre 2022
Sujet	<i>Prise en compte de la consommation énergétique dans l'équilibrage de lignes d'assemblage</i>
Encadrement	Co-encadrement avec Laurent Deroussi 50%
Financement	Bourse du Challenge 2 de CAP 2025 - co-rédaction du dossier de demande de financement
Publication	ROADEF'2023

En cours

Alia Chibani	de février 2023 à août 2023
Sujet	<i>Conseil fonctionnel sous SAP</i>
Encadrement	100%
Entreprise	Accenture France

Abdellah Faijjaoui	de mars 2023 à septembre 2023
Sujet	<i>Mise en place d'une organisation opérationnelle OPTER</i>
Encadrement	100%
Entreprise	SA SNCF Voyageurs

3.2 Publications

Le tableau 3.2 dresse un état de mes publications en un peu plus de 20 ans de recherche. Les noms soulignés sont ceux des étudiants ou post-doctorants encadrés.

Chapitres d'ouvrage

- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2005c). « Métaheuristiques et Modèles d'Evaluation pour le Problème d'Ordonnancement du Flow-Shop de Permutation Stochastique ». In : *Flexibilité et Robustesse en Ordonnancement*. Lavoisier. Chap. 6.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2008a). « Assembly Shop Scheduling ». In : *Resource-Constrained Project Scheduling Models, algorithms, extensions and applications*. Sous la dir. de C. ARTIGUES, S. DEMASSEY et E. NERON. John Wiley & Sons, Ltd. Chap. 15.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2008b). « Metaheuristics and performance evaluation models for the stochastic permutation Flow-Shop scheduling problem ». In : *Flexibility and Robustness in Scheduling (Control Systems Robotics and Manufacturing Series)*. Hermès. Chap. 7.
- ANDRÉ, V., N. GRANGEON et S. NORRE (2013a). « Combination of a Metaheuristic and a Simulation Model for the Scheduling of Resource-constrained Transport Activities ». In : *Metaheuristics for Production Scheduling*. John Wiley & Sons. Chap. 15.
- ANDRÉ, V., N. GRANGEON et S. NORRE (2013b). « Couplage métaheuristique et modèle de simulation pour l'ordonnancement d'activités de transport avec contraintes de ressources ». In : *Métaheuristiques pour l'ordonnancement multicritère et les problèmes de transport*. Hermès. Chap. 7.
- DEROUSSI, L., N. GRANGEON et S. NORRE (2014). « Techniques d'hybridation à base de métaheuristiques pour optimiser des systèmes logistiques ». In : *Métaheuristiques pour l'Optimisation Difficile*. Eyrolles. Chap. 12.
- DEROUSSI, L., N. GRANGEON et S. NORRE (2016). « Optimization of Logistics Systems Using Metaheuristic-Based Hybridization Techniques ». In : *Metaheuristics*. Springer. Chap. 14.

Revue internationale avec comité de lecture

- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2000a). « A review of the static stochastic Flow Shop scheduling problem ». In : *JDS (Journal of Decision System)* 9.2, p. 183-214.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2004). « A contribution to the stochastic Flow Shop scheduling problem ». In : *EJOR (European Journal of Operational research)* 151.2, p. 415-433.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2005a). « Markovian analysis for performance evaluation and scheduling in M machine stochastic flow-shop with buffers of any capacity ». In : *EJOR (European Journal of Operational research)* 161.1, p. 126-147.
- GRANGEON, N., S. NORRE et N. TCHERNEV (2005). « Heuristic-based approach for an industrial three dimensional layout problem ». In : *PPC (Production Planning and Control)* 16.8, p. 752-762.

Année	Chapitre d'ouvrage	Revue		Conf. internationales		Conf. nationales	
		Inter.	Nat.	Papier complet	Résumé	Papier complet	Résumé
2023		1		1			1
2022		1				1	
2021		2					
2020				1		1	
2019				1	1		1
2018		1			1	1	2
2017		1		2	1		2
2016	1		1				1
2015		2		1			3
2014	1			3		2	3
2013	2			2		1	3
2012		1				1	
2011		1	1	3		1	1
2010				2	2	2	1
2009						1	3
2008	2					1	1
2007		1		1		1	
2006				1	1	1	2
2005	1	2					1
2004		1				2	
2003			1	1		1	1
2002				1			2
avant 2002		1	1	4	2	2	2
Total	7	15	4	24	8	19	30

TABLE 3.2 – Publications en un peu plus de 20 ans

- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2007). « Metaheuristics based on Bin Packing for the line balancing problem ». In : *RAIRO Operational research* 41.2, p. 193-211.
- GRANGEON, N., P. LECLAIRE et S. NORRE (2011). « Heuristics for the re-balancing of a vehicle assembly line ». In : *IJPR (International Journal of Production Research)* 49.22, p. 6609-6628.
- GRANGEON, N. et S. NORRE (2012). « Extending metaheuristics based on bin packing for SALBP to PALBP ». In : *EJIE (European Journal of Industrial Engineering)* 6, p. 713-732.
- GAYRAUD, F., N. GRANGEON, L. DEROUSSI et S. NORRE (2015). « Notation and classification for logistics network design models ». In : *RAIRO Operational research* 49, p. 195-214.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et N. KLEMENT (2015a). « Activities planning and resources assignment on distinct places : a mathematical model ». In : *RAIRO Operational research* 49, p. 79-98.
- LAURENT, A., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2017a). « A new extension of the RCPSP in a Multi-Site context : Mathematical Model and Metaheuristics ». In : *Computers & Industrial Engineering* 112, p. 634-644.
- MBIADOU SALEU, R., L. DEROUSSI, D. FEILLET, N. GRANGEON et A. QUILLIOT (2018a). « An iterative two-step heuristic for the Parallel Drone Scheduling Traveling Salesman Problem ». In : *Networks* 72.4, p. 459-474.
- LAHRICHI, Y., N. GRANGEON, L. DEROUSSI et S. NORRE (2021a). « A Balance-First Sequence-Last Algorithm to design RMS - A Matheuristic with performance guaranty to balance Reconfigurable Manufacturing Systems ». In : *Journal of Heuristics Special issue on Matheuristics* 27, p. 107-132.
- LAHRICHI, Y., N. GRANGEON, L. DEROUSSI et S. NORRE (2021b). « A new split-based hybrid metaheuristic for the reconfigurable transfer line balancing problem ». In : *IJPR (International Journal of Production Research)* 59.4, p. 1127-1144.
- MBIADOU SALEU, R., L. DEROUSSI, D. FEILLET, N. GRANGEON et A. QUILLIOT (2022). « The Parallel Drone Scheduling Problem with Multiple Drones and Vehicles ». In : *European Journal of Operational Research* 300.2, p. 571-589.
- LAHRICHI, Y., D. DAMAND, L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2023). « Investigating two variants of the sequence-dependent robotic assembly line balancing problem by means of a split-based approach ». In : *International Journal of Production Research* 61.7, p. 2322-2338.

Revue nationale avec comité de lecture

- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2000c). « Metaheuristics for the deterministic Hybrid Flow Shop Problem ». In : *JESA (Journal Européen des Systèmes Automatisés)* 34.9, p. 1107-1135.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2003b). « Problèmes d'ordonnement dans les systèmes de production de type Flow-Shop Hybride en contexte déterministe ». In : *J3eA (Journal sur l'Enseignement des Sciences et Technologies de l'Information et des Systèmes)* 2.Hors série n°1.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON, D. LEMOINE et S. NORRE (2011). « Méthode pour une planification robuste : approche par couplage ». In : *Revue de MICADO : Ingénierie Numérique Collaborative, Numéro spécial CPI'09* 1-2.3.
- LAURENT, A., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2016b). « Modèle mathématique et méta-heuristiques pour un problème d'ordonnement et d'affectation de ressources dans une communauté hospitalière de territoire ». In : *JESA : Pilotage de la chaîne logistique dans un contexte de développement durable* 49.6, p. 677-702.

Conférences internationales avec comité de lecture et publication des actes sur papier complet

- GRANGEON, N., N. TCHERNEV et A. TANGUY (1998). « Generic simulation model for the Hybrid Flow Shop ». In : *CIE 24, 24th International Conference on Computers and Industrial Engineering, Londre, 9-11 septembre 1998*.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (1999a). « Metaheuristics for the Deterministic Hybrid Flow Shop Problem ». In : *IEPM 99 (International Conference on Industrial Engineering and Production Management), Glasgow, 12-15 juillet 1999*.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2000d). « Performance Evaluation and Sequencing in Stochastic Flow Shops ». In : *PMS 2000 (7th International Workshop on Project Management and Scheduling), Osnabrück, Germany, 17-19 avril, 2000*.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2001a). « Markovian analysis for performance evaluation in two machine stochastic Flow Shop ». In : *IEPM 01 (International Conference on Industrial Engineering and Production Management), Québec, 20-23 août 2001*.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2002b). « Markovian Model for the M.Machine Flow Shop with Limited Buffer or no Buffer ». In : *ESM 2002 (16th European Simulation Multiconference), Darmstadt, Germany, 3-5 juin 2002*.
- GRANGEON, N., S. NORRE et N. TCHERNEV (2003a). « Heuristic-based approach for an industrial three dimensional layout problem ». In : *International Conference on Industrial Engineering and Production Management (IEPM 03), Porto, 26-28 mai 2003*.
- ANDRÉ, V., N. GRANGEON et S. NORRE (2007). « Modelling and simulation of logistic flows ». In : *ORAHS'2007 (33rd International Conference on Operational Research Applied to Health Services), 15-20 juillet 2007, Saint-Étienne, France*.
- ANDRÉ, V., J. FAUCHER, N. GRANGEON et S. NORRE (2010). « Combination of metaheuristics and simulation model for planification of pick-up and delivery activities ». In : *PMS 2010 (12th International Workshop on Project Management and Scheduling), p. 57-60, 26 au 28 avril 2010, Tours, France*.
- GOURGUECHON, O., N. GRANGEON, S. NORRE et M. SUON (2010a). « A hybrid metaheuristic for a strategic supply chain planning problem with procurement-production-distribution activities and economy of scale ». In : *ILS'2010 (Third International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain), 14 au 16 avril 2010, Casablanca, Maroc*.
- AIBOUD, F., N. GRANGEON et S. NORRE (2011a). « Generation of 2D shapes with cellular automaton and genetic algorithm : extension of Chavoya's method ». In : *MIC 2011, IX Metaheuristics International Conference. Udine, Italy*.
- AIBOUD, F., N. GRANGEON et S. NORRE (2011b). « Simulated annealing based metaheuristics and binary cellular automata to generate 2D shapes ». In : *EA2011. 10th International Conference on Artificial Evolution. Angers*.
- ANDRÉ, V., N. GRANGEON, S. NORRE et F. PHILIPPE (2011a). « A combination metaheuristic-simulation for solving a transportation problem in a hospital environnement ». In : *IESM'11, 25 au 27 mai 2011, Metz, France*.
- AIBOUD, F., N. GRANGEON et S. NORRE (2013b). « Improving efficiency of metaheuristics for cellular automaton inverse problem ». In : *EA2013. 11th International Conference on Artificial Evolution. Bordeaux*.
- GAYRAUD, F., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2013a). « A New Mathematical Formulation For The Home Health Care Problem ». In : *HCist 2013, Conference on Health and Social Care Information Systems and Technologies, Lisbon, Portugal. Octobre 2013*.
- GAYRAUD, F., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2014a). « Combination between metaheuristics and simulation model for a routing problem, Project Management Scheduling ». In : *PMS 2014, Munich, Allemagne, 30 mars – 2 avril 2014*.

- GOURGAND, M., N. GRANGEON et N. KLEMENT (2014a). « An analogy between bin packing problem and permutation problem : a new encoding scheme ». In : *7th International Conference, APMS 2014, Ajaccio, France, 20-24 septembre 2014*.
- KLEMENT, N., N. GRANGEON et M. GOURGAND (2014). « Activities planning and resource assignment on multi-place hospital system : Exact and approach methods adapted from the bin packing problem ». In : *HEALTHINF 2014, 7th International Conference on Health Informatics, Angers, Mars 2014*.
- LAURENT, A., N. GRANGEON, L. DEROUSSI et S. NORRE (2015). « Multi-site RCPSP : Notations, Mathematical model and Resolution method ». In : *CIE45 (International Conference on Computers & Industrial Engineering), Metz (France), octobre 2015*.
- KLEMENT, N., N. GRANGEON et M. GOURGAND (2017). « Medical Imaging : Exams Planning and Resource Assignment : Hybridization of a Metaheuristic and a List Algorithm ». In : *HEALTHINF 2017 (10th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies (BIOSTEC 2017), Porto (Portugal), février 2017*.
- LAURENT, A., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2017b). « Comparison of Three Solution Encodings and Schedule Generation Scheme for the Multi-Site RCPSP ». In : *IFAC 2017 (International Federation of Automatic Control World Congress), Toulouse (France), juillet 2017*.
- LAHRICHI, Y., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2019a). « Polynomial Algorithm For Balancing a Sequence of Operations in Reconfigurable Transfer Lines ». In : *MIM 2019 (Manufacturing Modeling, Management and Control), Berlin (Allemagne)*. T. 52. 13, p. 981-986.
- LAHRICHI, Y., N. GRANGEON, L. DEROUSSI et S. NORRE (2020). « Multi-Objective Robotic Assembly Line Balancing Problem : A NSGA-II Approach Using Multi-Objective Shortest Path Decoders ». In : *PMS2020 : 17th International Conference on Project Management and Scheduling*.
- HADHBI, Y., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2023). « Improved Formulations and Branch-and-Cut Algorithm for the Unrelated Parallel Machines Scheduling Problem with a Common Server and Job-Sequence Dependent Setup Times ». In : *CODIT'2023 (9th International Conference on Control, Décision and Information Technologies), 3-6 juillet 2023*.

Conférences nationales avec comité de lecture et publication des actes sur papier complet

- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (1999b). « Métaheuristiques pour le problème du Flow Shop Hybride déterministe ». In : *JDA'99 (Journées Doctorales d'Automatique, Nancy, 21-223 septembre 1999*.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2001b). « Modèle générique orienté objet pour la modélisation et la simulation du Flow-Shop Hybride hiérarchisé ». In : *MOSIM'01 (3ème conférence Francophone de Modélisation et Simulation), Troyes, 25-27 avril 2001*.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2003a). « Outil d'aide à la décision pour la planification d'un atelier de fabrication de tôles laminées ». In : *MOSIM'03 (4ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation), Toulouse, 23-25 avril 2003*.
- BERTEL, S. et N. GRANGEON (2004). « Modélisation d'un problème industriel de Bin-packing 3D ». In : *MOSIM'04 (5ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation), Nantes, 1-3 septembre 2004*.
- GOURGAND, M. et N. GRANGEON (2004). « Minimisation du temps moyen de traitement dans un Flow-Shop Hybride à deux étages ». In : *MOSIM'04 (5ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation), Nantes, 1-3 septembre 2004*.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON, P. LECLAIRE et S. NORRE (2006). « Le problème du rééquilibrage du ligne d'assemblage de véhicules ». In : *MOSIM'06 (6ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation), Rabat (Maroc), 3-5 avril 2006*.

- GOURGAND, M., N. GRANGEON, D. LEMOINE et S. NORRE (2007). « Couplage de modèles pour une planification tactique robuste. Application à la planification dans un bloc opératoire ». In : *CPI'2007 (5ème conférence de Conception et Production Intégrée)*, Rabat, Maroc, 22-14 Octobre 2007.
- GRANGEON N., P. LECLAIRE et S. NORRE (2008). « Placement de contenants dans une ligne d'assemblage ». In : *MOSIM'08 (7ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation)*, Paris, avril 2008.
- GOURGUECHON, O., N. GRANGEON, S. NORRE et M. SUON (2009). « Configuration de réseaux logistiques Approvisionnement, Production, Distribution : Etat de l'art ». In : *JDJN-MACS 2009 (3èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS)*, Angers, 17-18 mars 2009.
- ANDRÉ, V., N. GRANGEON, S. NORRE et F. PHILIPPE (2010). « Un problème de transport dans un environnement hospitalier modélisé par un PDP-TW à contraintes de ressources ». In : *GISEH 2010, Clermont-Ferrand (France)*, 2-4 Septembre 2010.
- GOURGUECHON, O., N. GRANGEON, S. NORRE et M. SUON (2010b). « Un problème de planification stratégique de type production – distribution avec économies d'échelle et technologies de production ». In : *MOSIM 2010 (8ème Conférence Internationale de Modélisation et Simulation)*, Hammamet, Tunisie, 10-12 mai 2010.
- ANDRÉ, V., N. GRANGEON, S. NORRE et F. PHILIPPE (2011b). « Dimensionnement et constitution des plannings journaliers pour un problème de transport hospitalier ». In : *JDJN-Macs 2011, Marseille (France)*, 9-10 juin 2011.
- ANDRÉ, V., N. GRANGEON, S. NORRE et F. PHILIPPE (2012). « RCPSP et temps de montage dépendant de la séquence pour la modélisation et la résolution d'un problème de livraison collecte ». In : *MOSIM 2012, 06-08 Juin 2012, Bordeaux*.
- GAYRAUD, F., N. GRANGEON, L. DEROUSSI et S. NORRE (2013). « Etat de l'art des modèles de conception de réseaux logistiques : focus sur les coûts et les règles de fonctionnement ». In : *JDJN-Macs 2013, Strasbourg (France)*, 11-12 juillet 2013.
- GAYRAUD, F., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2014c). « Problème de tournées de véhicules avec synchronisation pour l'organisation de soins à domicile ». In : *MOSIM 2014 (Modélisation et Simulation)*. Nancy. 5-7 novembre 2014.
- LAURENT, A., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2014b). « Une extension du RCPSP pour la mutualisation de ressources entre plusieurs sites : le Multi Location RCPSP ». In : *MOSIM 2014 (Modélisation et Simulation)*. Nancy. 5-7 novembre 2014 MOSIM 2014 (Modélisation et Simulation). Nancy. 5-7 novembre 2014.
- LAHRICHI, Y., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2018a). « Reconfigurable transfer line balancing problem : A new MIP approach and approximation hybrid algorithm ». In : *MOSIM 2018 (Modélisation et Simulation)*. Toulouse, 27-29 juin 2018.
- LAHRICHI, Y., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2020). « A min-max path approach for balancing robotic assembly lines with sequence-dependent setup times ». In : *MOSIM 2020 (Modélisation et Simulation)*. 12-14 novembre 2020, 3ème Best Awards Paper.
- GRANGEON, N., D. SARRAMIA, L. DEROUSSI et A.-C. PALIER (2022). « Un entrepôt pédagogique grandeur nature pour les étudiants de Montluçon ». In : *14èmes Rencontres de l'Association Internationale de la Recherche en Logistique et Supply Chain Management (AIRL-SCM)*.

Conférences internationales et publication des actes sur résumé

- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (1998). « Heuristics and stochastic algorithms for the hybrid flow shop problem ». In : *EURO XVI (16th European Conference on Operational Research)*, Bruxelles, 12-15 juillet 1998.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2000b). « A review of the stochastic Flow Shop scheduling problem ». In : *ORBEL 14 (14th Conference on Quantitative Methods for Decision Making)*, Mons, 19-21 Janvier 2000.

- GOURGAND, M., N. GRANGEON, D. LEMOINE et S. NORRE (2006). « Software tool for the master production schedule conception based on the Capacitated Lot Sizing Problem ». In : *ICAPS'2006, 6-10 Juin 2006, Cumbria, Grande-Bretagne*.
- AIBOUD, F., N. GRANGEON et S. NORRE (2010). « Using cellular automata and genetic algorithm to generate 2D forms ». In : *META 2010 (International Conference on Metaheuristics and Nature Inspired Computing), Djerba Island, Tunisie, 27-31 octobre 2010*.
- GOURGUECHON, O., N. GRANGEON et S. NORRE (2010). « Improved neighbouring systems for a production distribution problem ». In : *META 2010 (International Conference on Metaheuristics and Nature Inspired Computing), Djerba Island, Tunisie, 27-31 octobre 2010*.
- MBIADOU SALEU, R., D. FEILLET, A. QUILLIOT, N. GRANGEON et L. DEROUSSI (2017b). « Optimization of urban delivery systems with drones ». In : *VeRoLog (Annual Workshop of the EURO Working Group on Vehicle Routing and Logistics optimization), 10-12 juillet 2017 Amsterdam (Netherlands)*.
- LAHRICHI, Y., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2018b). « Reconfigurable transfer line balancing problem : exact and heuristic method ». In : *EURO 2018 (29th European Conference On Operational Research), Valencia, 8-11 juillet 2018*.
- MBIADOU SALEU, R., D. FEILLET, A. QUILLIOT, N. GRANGEON et L. DEROUSSI (2019). « Heuristic and dynamic programming for Parallel Drone Scheduling with Multiple Drones and Vehicles ». In : *VeRoLog (Annual Workshop of the EURO Working Group on Vehicle Routing and Logistics optimization), 3-5 juin 2019 Seville (Espagne)*.

Conférences nationales et publication des actes sur résumé

- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (1999c). « Méthodes exactes et algorithmes stochastiques pour le problème du Flow Shop Hybride ». In : *ROADEF 1999*. Autrans, 13-15 janvier.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2000e). « Une contribution au problème d'ordonnancement du Flow Shop stochastique ». In : *ROADEF 2000*. Nantes, 26-28 janvier.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2002a). « Le Flow-Shop Hybride Hiérarchisé : Une application industrielle Â ». In : *ROADEF 2002*. Paris, 20-22 février.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2002c). « Modèle markovien pour le Flow-Shop à m machines avec des stocks de capacité limitée ou nulle ». In : *ROADEF 2002*. Paris, 20-22 février.
- GRANGEON, N., S. NORRE et N. TCHERNEV (2003b). « Problème de placement en trois dimensions ». In : *ROADEF 2003*. Avignon, 26-28 février.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2005b). « Métaheuristique utilisant un système de voisinage issu du bin-packing pour le line balancing ». In : *ROADEF 2005*. Tours, 14-16 février.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON, P. LECLAIRE et S. NORRE (2006). « Rééquilibrage de lignes d'assemblage ». In : *ROADEF 2006*. Lille, 6-8 février.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2006). « SM-RCPSP avec profil de demande en ressources variable : extension ou cas particulier ? ». In : *ROADEF 2006*. Lille, 6-8 février.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON, D. LEMOINE et S. NORRE (2008). « Métaheuristique pour le capacitated lot sizing problem ». In : *ROADEF 2008*. Clermont-Ferrand, 25-27 février.
- ANDRÉ, V., N. GRANGEON et S. NORRE (2009). « Dimensionnement et ordonnancement de livraisons de repas ». In : *ROADEF 2009*. Nancy, 10-12 février.
- GRANGEON, N. et S. NORRE (2009). « Heuristiques et métaheuristique pour le Multiproduct Parallel Assembly Lines Balancing Problem ». In : *ROADEF 2009*. Nancy, 10-12 février.
- SUON, M., N. GRANGEON, S. NORRE et O. GOURGUECHON (2009). « Planification stratégique d'un réseau logistique international ». In : *ROADEF 2009*. Nancy, 10-12 février.
- ANDRÉ, V., J. FAUCHER, N. GRANGEON et S. NORRE (2010). « Couplage métaheuristique - simulation pour l'organisation d'activités de livraison et de collecte ». In : *ROADEF 2010*. Toulouse, 24-26 février.

- AIBOUD, F., N. GRANGEON et S. NORRE (2011). « Couplage métaheuristique à base de recuit simulé et automate cellulaire pour la génération de formes 2D ». In : *ROADEF 2011*. Saint-Etienne, 2-4 mars.
- AIBOUD, F., N. GRANGEON et S. NORRE (2013a). « Couplage d'automate cellulaire et métaheuristique pour la génération de formes 2D symétriques ». In : *ROADEF 2013*. Troyes, 13-15 février.
- GAYRAUD, F., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2013b). « Conception de réseaux logistiques : un état de l'art des modèles multi-périodes ». In : *ROADEF 2013*. Troyes, 13-15 février.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et N. KLEMENT (2013). « La Communauté Hospitalière de Territoire : application à l'imagerie médicale ». In : *ROADEF 2013*. Troyes, 13-15 février.
- GAYRAUD, F., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2014b). « Modélisation mathématique et couplage métaheuristique-simulation pour un problème de tournée de véhicules ». In : *ROADEF 2014*. Bordeaux, 26-28 février.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et N. KLEMENT (2014b). « Planification de tâches, affectation de ressources : problème du bin packing résolu par la PSO ». In : *ROADEF 2014*. Bordeaux, 26-28 février.
- LAURENT, A., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2014a). « RCPSP multisites – Application à une CHT ». In : *ROADEF 2014*. Bordeaux, 26-28 février.
- GAYRAUD, F., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2015). « Problèmes de tournées de véhicules avec synchronisation en contexte incertain – Application aux structures de soins à domicile ». In : *ROADEF 2015*. Marseille, 25-27 février.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et N. KLEMENT (2015b). « Problème du bin packing avec incompatibilités : résolution par un couplage hiérarchique métaheuristique heuristique ». In : *ROADEF 2015*. Marseille, 25-27 février.
- LAURENT, A., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2015). « Proposition de méthodes de résolution approchées pour le problème du RCPSP Multi-Location ». In : *ROADEF 2015*. Marseille, 25-27 février.
- LAURENT, A., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2016a). « Comparaison de différentes approches de résolution par méta-heuristique pour le RCPSP multi-site. ». In : *ROADEF 2016*. Compiègne, 10-12 février.
- LAURENT, A., N. GRANGEON, L. DEROUSSI et S. NORRE (2017). « Modèles mathématiques pour le RCPSP multi-site : deux approches ». In : *ROADEF 2017*. Metz, 22-24 février.
- MBIADOU SALEU, R., D. FEILLET, A. QUILLIOT, N. GRANGEON et L. DEROUSSI (2017a). « Optimisation de systèmes de livraison urbaine par drones ». In : *ROADEF 2017*. Metz, 22-24 février.
- LAURENT, A., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2018). « Modèles mathématiques à base de flots pour le Multi-site RCPSP ». In : *ROADEF 2018*. Lorient, 21-23 février.
- MBIADOU SALEU, R., L. DEROUSSI, D. FEILLET, N. GRANGEON et A. QUILLIOT (2018b). « Méthodes exacte et heuristique pour un système de livraison composé d'un véhicule et des drones travaillant sans synchronisation ». In : *ROADEF 2018*. Lorient, 21-23 février.
- LAHRICHI, Y., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2019b). « Un algorithme de plus court chemin polynomial pour l'équilibrage des lignes de production reconfigurables ». In : *ROADEF 2019*. Le Havre, 19-21 février.
- TUYABA, A., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2023). « Prise en compte de la consommation énergétique dans l'équilibrage de lignes d'assemblage ». In : *ROADEF 2023*. Rennes, 20-23 janvier.

3.3 Rayonnement scientifique

Contrats de recherche

- Intervenant dans le contrat **Pechiney** de 2002 à 2003 : «Optimisation de la charge des ateliers». L'objet de l'étude était la définition et la proposition d'une maquette d'un logiciel de placement de tôles laminées dans un four. Une heuristique et une hybridation (méta-heuristique \Leftrightarrow algorithme de liste) ont été proposées pour la résolution d'un problème de placement fortement contraint en 3 dimensions. J'ai participé aux réunions de travail avec la société et proposé des méthodes d'optimisation. Ce travail a donné lieu à 3 publications (revue PPC et conférences IEPM'03 et ROADEF'2003).
- Intervenant dans le contrat **PSA** de 2004 à 2005 : « Equilibrage de lignes d'assemblage ». L'objet de l'étude était la définition et la proposition d'une maquette d'un logiciel pour le rééquilibrage des lignes d'assemblage. J'ai participé aux réunions de travail avec la société et proposé des méthodes d'optimisation dans le cadre du stage de master de Patrice Leclair. Ce travail est présenté dans le chapitre 4 de la partie II de ce document et a donné lieu à 3 publications (revue IJPR et conférences MOSIM'2006 et ROADEF'2006).
- Intervenant dans le contrat **PSA** : « Optimisation de la logistique internationale » dans le cadre de la convention CIFRE de Médéric Suon de mars 2007 à mars 2010. Montant : 45000 euros TTC. L'objet de l'étude était la proposition de méthodes pour la planification de la logistique internationale. J'ai participé aux réunions de travail avec la société et coencadré la thèse de Médéric. Ce travail a donné lieu à 5 publications dans des conférences (ILS'2010, META'2010, MOSIM'2010, JDJN-MACS'2009 et ROADEF'2009).
- Intervenant dans le cadre de la collaboration avec le **CHU de Clermont-Ferrand** : « Modélisation du Nouvel Hôpital d'Estaing (projet NHE) » et plus particulièrement dans le cadre de la thèse de Virginie André de février 2008 à février 2011. L'objet de l'étude était la proposition de modèles pour le dimensionnement et l'organisation logistique du futur hôpital. J'ai participé aux réunions avec le CHU et coencadré la thèse de Virginie. Ce travail est présenté dans le chapitre 2 de la partie II de ce document et a donné lieu à 10 publications (2 chapitres d'ouvrage et 8 conférences IESM'2011, PMS'2010, ORAHS'2007, MOSIM'2012, JDJN-MACS'2011, GISEH'2010, ROADEF'2010, ROADEF'2009).
- Intervenant dans le contrat avec la société **IBC** dans le cadre de la thèse de Fazia Aiboud de novembre 2009 à novembre 2012. L'objectif de cette collaboration était la réalisation d'un outil logiciel pour le pilotage d'un modèle de génération d'organes. Ce travail a été mené en collaboration avec l'équipe PCSV du laboratoire LPC (Laboratoire de Physique de Clermont-Ferrand). J'ai participé aux réunions et coencadré la thèse de Fazia. Ce travail a donné lieu à 6 publications dans des conférences (EA'2013, EA'2011, MIC'2011, META'2010, ROADEF'2013, ROADEF'2011).

Animation

- **Co-responsable du Groupe de Travail«Origin»** : Dans le cadre de la transition digitale des systèmes industriels, les préoccupations du groupe de travail se situent au cœur des problématiques adressées par l'industrie du futur. Le groupe se propose de modéliser, d'évaluer les performances (logistique, environnementale, énergétique etc.) et d'optimiser opérationnellement ces systèmes de plus en plus complexes. Ainsi, le groupe s'intéresse à l'ordonnancement intégré, ordonnancement qui prend en compte la diversité des activités (production, transport, maintenance, ...), d'acteurs et d'enjeux (humains, environnementaux, énergétiques, ...) dans un même système complexe plutôt qu'en les adressant séparément. Ce groupe est rattaché au GdR MACS depuis 2003, à la SAGIP depuis 2020 et au GdR RO depuis 2006.

Depuis 2021, je suis co-responsable du groupe avec David Lemoine et Marie-Ange Manier : animation des réunions, proposition de sessions dans des conférences, relectures des papiers soumis, animation des sessions.

- **Corespondante Egalité au LIMOS pour l'INS2I** : Avec 23,3% de femmes, la question de l'égalité femmes-hommes au sein des unités est une priorité de l'INS2I. La création d'un réseau de référents a pour objectif de créer un cadre dans tous les laboratoires de l'institut pour accroître la visibilité des recherches de femmes, améliorer les retours d'interruption de carrière et augmenter les prises de responsabilité.

Depuis février 2021, je participe aux réunions mensuelles organisées par la délégation Rhône Auvergne du CNRS (COREGAL café), je diffuse les informations et actualités du réseau, calcule et suit les statistiques du laboratoire et réalise des présentations.

J'ai été formée aux Violences Sexistes et Sexuelles (VSS) et suis le point d'entrée à niveau du LIMOS à tout signalement.

Membre de comités

Comités de sélection

2017 :

- MCF - 1 poste en 27^e section - Université Clermont Auvergne
- Maître assistant - Ecole des mines de Saint Etienne

2018 :

- MCF - 1 poste en 61/27^e sections - Grenoble INP Ecole de Génie Industriel

2020 :

- MCF - 1 poste en 27^e section - Université de Tours
- MCF - 2 postes en 27^e section - Université Clermont Auvergne - 1 Vice-présidence,

2021 :

- MCF - 1 poste en 27^e section - Université Clermont Auvergne - Vice-présidence.

2022 :

- MCF - 1 poste en 27^e section - Université Clermont Auvergne.
- MCF - 1 poste en 27/61^e sections - Clermont Auvergne INP.

2023 :

- MCF - 2 poste en 27^e section - Université Clermont Auvergne - 1 Vice-présidence.

Comités de suivi de thèse

Depuis 2017, 2 ou 3 par an pour le LIMOS et l'école doctorale Sciences Pour l'Ingénieur

Organisation de conférences et de sessions

- Membre de comités scientifiques : ROADEF'2023, ROADEF'2022, ROADEF'2021,
- Membre de comités d'organisation :
 - 2022 : Colloque Recherche de l'IUT Clermont Auvergne : co-responsable du site de gestion du colloque (sous scienceConf),
 - 2019 : Journée de la recherche à Montluçon en 2019 : programme, animation d'une session,
 - 2012 : Journées STP du GdR MACS en 2012 à Clermont-Ferrand : responsable du site web (inscription, organisation, programme),

2010 : Conférence GISEH 2010 à Clermont-Ferrand : accueil des participants,

2008 : Congrès ROADEF'2008 à Clermont-Ferrand : accueil des participants,

2006 : Conférence MOSIM'06 à Rabat au Maroc : responsable du site web (inscription, organisation, programme), réalisation des actes du CD-Rom.

— Organisation de sessions dans des conférences :

2023 :

— Congrès annuel de la SAGIP, Session META / Origin,

— 21th EU/ME meeting and Quantum School, session Origin «Metaheuristics for scheduling problems»,

— Congrès ROADEF'2023, Session GT2L/Origin «Problème de gestion de ressource dans la chaîne logistique » ,

— Congrès ROADEF'2023, Session Origin « Ordonnancement et durabilité»,

— Congrès ROADEF'2023, Session Origin/P2LS «Planification et Ordonnancement : approches intégrées dans le contexte de la transition numérique»,

2022 :

— Conférence MIM 2022, Track Origin «Sustainable Scheduling»,

— Conférence MIM 2022, Track META / Origin «Metaheuristics for industry 4.0» avec Laurent Derroussi, Patrick Siarry et El Ghazali Talbi pour le groupe META,

— Conférence MIM 2022, Session SED/Origin : « Hybrid Approches for Production Planning and Scheduling » avec Alexis Aubry et Pascale Marangé pour le groupe SED,

— Congrès ROADEF'2022, Session Origin «Ordonnancement intégré dans les systèmes de production de biens et de services»,

2021 :

— Congrès ROADEF'2021, Track Origin «Ordonnancement Intégré pour l'Usine du Futur»,

— Journées STP et Automatique de la SAGIP, Session Origin « Impact de la transformation digitale sur l'ordonnancement des systèmes de production » ,

2014 :

— Conférence MOSIM 2014, Session Bermudes « Ordonnancement et ressources humaines » avec Odile Morineau,

2010 :

— Conférence MOSIM 2010, Session « Modelling and Optimisation in bio integrative research » avec Laurent Derroussi, Michel Gourgand et David Sarramia.

— Présidence de sessions lors de conférences nationales ou internationales :

— session Bermudes « Ordonnancement pour l'Industrie 4.0 » lors du congrès ROADEF'2020,

— session «Metaheuristique» avec E.Talbi lors du congrès ROADEF'2013,

— session «Outils logiciels» lors du congrès ROADEF'2009,

— session «Ordonnancement» lors de la conférence MOSIM'2008,

— session «Problèmes d'ordonnancement stochastiques» lors de la conférence CPI'2007,

— session «Ordonnancement dans les systèmes de production» lors de la conférence MOSIM'2006.

Membre de GrR, de groupes de travail

Membre du GdR RO et du GdR MACS.

Membre de groupes de travail :

- Origin (anciennement Bermudes), rattaché au GdR MACS depuis 2003, à la SAGIP depuis 2020 et au GdR RO depuis 2006.
- Meta : « Métaheuristiques : Théorie et Applications » rattaché au GdR MACS, à la SAGIP et au GdR RO.

Participation à des projets :

- du GdR RO : « L'intégration du transport dans la chaîne logistique » de mai 2007 à mars 2008,
- du GdR RO : « Proposition d'un modèle de planification générique multi-sites prenant en compte les problèmes de transports avec capacité » de mai 2008 à mars 2009,
- du GdR MACS : « Prise de décision dans la chaîne logistique en milieu incertain » de février 2007 à novembre 2007.

Relecture d'articles, évaluation

Pour des **revues internationales**

- Régulièrement (plusieurs fois par an) pour des revues internationales : IJPR (International Journal of Production Research), ESWA, Transportation Research,
- Occasionnellement pour des revues internationales : COR, EJOR, RAIRO, OMEGA, EJIE, INFORMS Journal on Computing, Discrete Dynamic in Nature and Society,

Pour des **conférences nationales ou internationales** : MIM'2022, APMS'2021, MOSIM'2014, MOSIM'2012, MOSIM'2008, META'2006, MOSIM'2006, JDMACS'2005, GI'2005, CIFA'2004, MOSIM'2004, ROADEF.

Evaluation d'un **mémoire de magister** de mathématique, option Recherche Opérationnelle de Mehdi Ouafia intitulé « Le flow shop stochastique à 2-machines » soutenu en mars 2008 à l'Université de Blida en Algérie.

Chapitre 4

Activités administratives

Un enseignant chercheur se doit également de s'impliquer dans la vie de son établissement au travers de tâches administratives. C'est pourquoi, depuis ma nomination, je participe activement à la vie de mon département d'enseignement, que ce soit au département MMI ou au département MLT.

Au fil des années, je me suis occupée de diverses tâches telles que la gestion des modalités de contrôles de connaissances, des notes, des absences, du recrutement, des emplois du temps. De 2009 à 2016, j'ai assuré la coresponsabilité de la licence professionnelle LOGIN. De septembre 2016 à août 2019, j'ai été cheffe du département Gestion Logistique et Transport.

Je me suis investie à l'IUT en tant que Chargée de mission Scolarité/alternance de 2010 à 2014, Chargée de mission Formations depuis 2021 et au travers de mandats au Conseil du département GLT et au Comité d'établissement.

Je participe également au développement des formations de l'IUT avec le coportage de projets de demande d'ouverture en apprentissage et actuellement la participation au groupe de travail pour la création d'un Campus des Métiers et des Qualifications (CMQ).

4.1 Participation à la vie du département

Au département MMI (SRC)

De septembre 2002 à janvier 2007, j'ai assuré les tâches suivantes :

- gestion des modalités de contrôles de connaissances et des notes : vérification des calculs sous un outil développé sous Filemaker, organisation des commissions d'examen des résultats
- gestion des absences : suivi des absences justifiées et injustifiées et mise en place des sanctions en cas de défaut d'assiduité
- gestion du recrutement : organisation de l'examen des dossiers, saisie des résultats d'admission sur CIELL2
- correspondante IUT en Ligne pour le département SRC en 2004-2005.

Au département MLT (GLT)

J'ai assuré les tâches suivantes :

- gestion du recrutement en DUT et LP (en 2014 et 2015 pour le DUT et de 2009 à 2016 pour la LP) : organisation de l'examen des dossiers et des entretiens, suivi et saisie des résultats d'admission sur APB (Application Post Bac) et CIELL2.

- gestion des emplois du temps de 2^e année de DUT (de 2008 à 2011) : emplois du temps hebdomadaires, organisation des contrôles de connaissances, coordination des intervenants.
- gestion des services en DUT et LP (de 2009 à 2019) : déclaration et suivi des services des collègues, suivi de la consommation des heures attribuées au département, respect des maquettes.

Depuis février 2007, j'assure les tâches suivantes :

- gestion des modalités de contrôles de connaissances en DUT/BUT et LP (depuis 2007) : recueil des modalités auprès des collègues, vérification du respect des règles (CC, ET) et interface avec la scolarité de l'IUT.
- gestion des notes en DUT/BUT et LP (depuis 2007) : vérification des calculs sous Apogée, organisation des commissions d'examen des résultats, participation aux jurys de validation des semestres.
- gestion du recrutement en DUT/BUT des étudiants internationaux « Etudes en France » (depuis 2020) : étude des dossiers, suivi des choix.

et je participe à la vie du département et à sa promotion : Journée Porte Ouverte et autres manifestations organisées par le département, examen de dossiers de candidature ParcoursSup et entretiens de recrutement, réunions d'équipes hebdomadaires.

4.2 Responsabilités administratives

Co-responsabilité de la LP LOGIN

De septembre 2009 à septembre 2016 :

- accueil et suivi des étudiants, recherche de vacataires, communication (site web, plaquettes, affiches, ...), organisation des évaluations des enseignements et des conseils de perfectionnement.
- corédaction des dossiers d'autoévaluation de 2010, de réhabilitation de 2012, d'évaluation de 2015 et d'accréditation de 2016 qui ont permis de faire évoluer les objectifs et la maquette de la formation pour toujours mieux répondre aux besoins des entreprises,
- ouverture à l'alternance de la formation avec une première phase en contrat de professionnalisation (2011) puis en contrat d'apprentissage (2016).

Cheffe du département Gestion Logistique et Transport

De septembre 2016 à septembre 2019 :

- animation du département et répartition des tâches entre les collègues enseignants, enseignants-chercheurs et BIATS,
- organisation et animation des réunions du conseil de département, participation aux réunions mensuelles du comité de direction,
- représentation du département à l'extérieur (Comité Régional de la Formation Professionnelle en Transport et en Logistique, Comité d'Expansion Economique de l'Allier, ...)
- gestion du budget du département (74 k€ en 2017 et 78 k€ en 2018), entretiens d'évaluation professionnelle, validation des demandes d'absence et de congés BIATS, ...
- rédaction du dossier d'évaluation du département par la Commission Pédagogique Nationale.

Membre de l'équipe de direction de l'IUT d'Allier, en tant que Chargée de mission Scolarité/alternance

De 2010 à 2014, ma mission comportait deux axes :

- En lien avec le service scolarité de l'IUT, ma mission concernait la gestion de l'offre de formation (autoévaluation des LP, réhabilitation des diplômés), l'écriture des procédures de scolarité (gestion des jurys, saisie des résultats sur Apogée, gestion Apogée) et la réécriture de la partie du règlement intérieur de l'IUT concernant la scolarité.
- En lien avec le service formation continue de l'IUT, j'ai travaillé au développement de l'alternance à l'IUT : développement des contrats de professionnalisation, formalisation des procédures, rédaction de la convention IUT/entreprise, initiation de la rédaction du dossier de demande d'ouverture en apprentissage de la licence professionnelle BEPCB de l'IUT et négociation avec le CFA. Ce travail a abouti à la création du pôle entreprise de l'IUT d'Allier qui comptait 3 personnes jusqu'à sa fusion avec l'IUT de Clermont.

Membre de l'équipe de direction élargie de l'IUT Clermont Auvergne, en tant que Chargée de mission Formation

Depuis septembre 2021, je coordonne une équipe de 4 personnels de l'IUT pour la mise en place du BUT suite à la réforme de la licence professionnelle :

- modélisation de la structures des enseignements dans Apogée (BUT et LP),
- paramétrage des règles de calcul (BUT et LP),
- modélisation des P.V. et des relevés de notes dans Diva (BUT),
- préparation des jurys (BUT),
- mise en place des conseils de perfectionnement (BUT),
- rédaction des contrats pédagogiques, de notes de cadrage, de procédures, ...

4.3 Mandats locaux et nationaux

A l'IUT

- Membre élue du conseil du département Gestion Logistique et Transport de l'IUT d'Allier de septembre 2007 à septembre 2010, de septembre 2013 à septembre 2016 et de 2019 à 2022.
- Vice-présidente du jury de validation des semestres de l'IUT Clermont Auvergne en 2021,
- Vice-présidente du jury de recrutement en BUT de l'IUT Clermont Auvergne en 2021,
- Membre élue du Comité d'Établissement de l'IUT d'Allier de 2005 à 2013 et de 2019 à 2021.
- Membre invitée au Conseil de l'IUT d'Allier en tant que chargée de mission scolarité de 2010 à 2014
- Membre de droit au Conseil de l'IUT d'Allier de septembre 2016 à août 2019

Au LIMOS

- Membre élue du Conseil du laboratoire depuis 2013

Au national

- Secrétaire de l'Assemblée des Chefs de Département GLT de octobre 2017 à août 2019

4.4 Développement de la formation

Développement de l'alternance

En 2011, j'ai travaillé sur l'ouverture de la Licence professionnelle LOGIN en contrat de professionnalisation : construction du calendrier, recherche d'entreprises et de contrats. Ce travail a abouti à une ouverture en 2011 avec 4 alternants, puis une progression jusqu'à l'ouverture en apprentissage en 2016 de la formation. J'ai corédigé le dossier de demande d'ouverture en apprentissage qui a été acceptée à la première demande.

Fort de cette expérience, j'ai corédigé le dossier de demande d'ouverture en apprentissage du DUT GLT et de l'année spéciale du DUT GLT, qui a été acceptée à la deuxième demande pour une ouverture des deux formations en septembre 2017.

Formation GSP de Polytech' Clermont

En 2007, j'ai participé à l'écriture d'un certain nombre de modules de la formation GSP » (Génie des Systèmes de Production) de Polytech' Clermont : Informatique 1, Informatique 2, Système d'information ERP, Mathématique 3, Informatique 3 Génie Logiciel.

Création d'un CMQ

Lors de son évaluation, une des perspectives du département était la création d'un Campus des Métiers et des Qualifications en Transport et Logistique dans la région Auvergne. Cette idée est devenue un projet prioritaire pour l'Université Clermont Auvergne.

Le transport et la logistique connaissent de fortes mutations à l'échelle nationale et internationale : préoccupations environnementales, transition écologique, développement des TIC, robotisation des entrepôts, déploiement du connecté, essor du e-commerce qui ont des effets sur les emplois, les activités et les compétences recherchées par les employeurs. L'objectif du CMQ est de constituer un réseau auvergnat actif et réactif d'établissements de formation et d'entreprise et de le structurer en pôle d'excellence pour répondre à ces transformations.

Le projet de création du Campus des Métiers et des Qualifications «Logistique, transport, solutions connectées et durables» est co-porté par le lycée professionnel Pierre Boulanger de Pont-du-Château et l'UCA Clermont-Auvergne à travers l'IUT Clermont Auvergne.

Depuis 2021, je suis membre du Comité de Pilotage du projet :

- identification du périmètre et des objectifs du projet,
- discussion avec les partenaires (institutions, entreprises, établissements de formation, ...) qui constitueront le réseau,
- rédaction du dossier de labellisation,
- rédaction des fiches actions.

Deuxième partie

Synthèse scientifique

Chapitre 1

Synthèse des activités de recherche

Sommaire

1.1	Introduction	35
1.2	Métaheuristiques et hybridations	36
1.2.1	Un petit rappel sur les métaheuristiques	37
1.2.2	Hybridation : quelques définitions	38
1.3	Thématiques principales	42
1.3.1	Ordonnancement d'activités dans un environnement multi-sites	43
1.3.2	Extensions du problème de voyageur de commerce multiple	47
1.3.3	Équilibrage et rééquilibrage de lignes d'assemblage	50
1.4	Autres travaux	54
1.4.1	Planification de chaîne logistique	54
1.4.2	Problème inverse des automates cellulaires	55
1.5	Conclusion	57
1.5.1	Ordonnancement d'activités dans un environnement multi-sites	58
1.5.2	Extensions du problème de voyageur de commerce multiple	59
1.5.3	Équilibrage et rééquilibrage de lignes d'assemblage	59
1.5.4	Autres travaux	60
	Références	61

1.1 Introduction

Depuis ma nomination en 2002, j'appartiens à l'axe Outils Décisionnels pour la Production et les Services (ODPS) du Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes (LIMOS UMR CNRS 6158). Mes travaux de recherche concernent principalement la proposition de métaheuristiques et de couplages ou d'hybridations à base de métaheuristiques pour des problèmes d'optimisation combinatoire dans des systèmes de production de biens et de services.

Au cours de ma carrière, j'ai eu l'opportunité de travailler sur plusieurs thématiques, des problèmes d'ordonnancement au problème inverse des automates cellulaires en passant par le problème du voyageur de commerce multiple et l'équilibrage de lignes d'assemblage au gré de collaborations industrielles.

La complexité des problèmes étudiés s'est accrue bien souvent avec la nécessité de prendre en compte de nouvelles contraintes ou de nombreuses ressources. Certains problèmes présentent une double complexité (figure 1.1) :

- une **complexité structurelle et fonctionnelle** liée à la structure du système étudié qui se traduit par la difficulté d'évaluer de manière simple le ou les critères de performance,

- une **complexité algorithmique** qui, par abus de langage, désigne la complexité des problèmes d'optimisation combinatoire. Elle se traduit par la recherche d'une solution qui optimise un ou plusieurs critères de performance. Les problèmes auxquels nous nous intéressons sont en général NP-difficiles.

Selon la ou les complexités rencontrées, nous avons été amenés à proposer des couplages avec des modèles d'évaluation des performances ou des hybridations avec d'autres méthodes d'optimisation. En effet, grâce à l'augmentation des capacités de calcul, les méthodes d'optimisation peuvent s'avérer de puissants alliés.

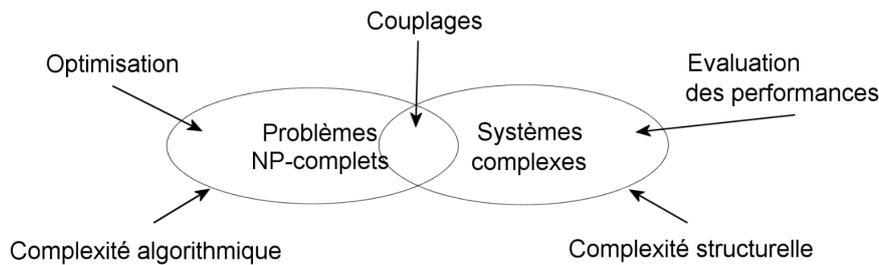


FIGURE 1.1 – Double complexité

Pour chaque problème étudié, la démarche de résolution est la même :

- Après une analyse du système étudié, le problème d'optimisation est modélisé mathématiquement généralement sous la forme d'un **programme linéaire (ou non linéaire) en nombres entiers (ou mixtes)** permettant de formaliser les contraintes de manière précise. Dans certains cas, certaines contraintes n'ont pas pu être exprimées et des hypothèses simplificatrices se sont révélées nécessaires.
- La résolution du programme linéaire étant bien souvent limitée par la taille des instances, des heuristiques et des hybridations sont ensuite définies.
- Dans le cas où la modélisation mathématique n'a été possible que sous conditions d'hypothèses simplificatrices, révélatrices de la complexité structurelle et fonctionnelle du système étudié, la construction d'un **modèle d'évaluation des performances** pour déterminer le ou les critères de performances pour une solution donnée a alors été envisagée. Ces modèles d'évaluation des performances ont été couplés avec une **métaheuristique** pour la résolution du problème d'optimisation.

Après une présentation générale de ma vision des métaheuristiques, des couplages et des hybridations, ce chapitre présente les trois principales thématiques de recherche abordées pendant ces vingt dernières années et deux thématiques secondaires. L'objectif est de donner un panorama des métaheuristiques proposées avec le même niveau de détail. Les trois principales thématiques sont abordées de manière plus détaillée dans les 3 chapitres suivants.

1.2 Métaheuristiques et hybridations

Les métaheuristiques sont des méthodes d'optimisation qui, au premier abord, peuvent laisser perplexes, mais au fil des années, ces méthodes ont su prouver leur efficacité comme le montre le grand nombre de publications dans le domaine.

Le terme «*métaheuristique*» a été introduit par (GLOVER 1977) et d'après (SØRENSEN, SEVAUX et al. 2018) cette classe de méthodes a réellement pris son envol entre les années 1980 et 2000 avec la proposition de nombreuses versions. Pendant ces 20 dernières années, les métaheuristiques se sont diversifiées et ont gagné en efficacité grâce à la proposition de couplages avec d'autres outils

tels que des modèles pour l'évaluation des performances ou des méthodes d'optimisation. Dans le cas de couplage avec une méthode d'optimisation, le terme «*hybridation*» est apparu.

Dans cette partie, après un petit rappel sur les métaheuristiques au travers de définitions, nous présentons plus précisément les notions de couplage et d'hybridation afin de situer le cadre de nos travaux.

1.2.1 Un petit rappel sur les métaheuristiques

(SÖRENSEN et GLOVER 2013) ont constaté le manque de définition claire du terme métaheuristique et proposent la définition suivante : «*A metaheuristic is a high-level problem-independent algorithmic framework that provides a set of guidelines or strategies to develop heuristic optimization algorithms. The term is also used to refer to a problem-specific implementation of a heuristic optimization algorithm according to the guidelines expressed in such a framework.*»

Une métaheuristique est donc un principe algorithmique qui définit un cadre général pour construire une méthode de résolution adaptée à un problème d'optimisation donné. Les métaheuristiques peuvent être vues comme une alternative aux méthodes exactes en produisant une solution «pas trop mauvaise» en un temps raisonnable.

Dans la communauté scientifique, deux directions de recherche peuvent être distinguées (SÖRENSEN, SEVAUX et al. 2018) :

- la proposition et l'étude de métaheuristiques, au sens du principe algorithmique. Par exemple, nous pouvons citer les travaux de (LOURENÇO et al. 2003) sur la Recherche Locale Itérée (ILS - Iterated Local Search) ou de (DORIGO et GAMBARDILLA 1997) sur les colonies de fourmis (ACO - Ant Colony Optimisation). Les travaux du groupe META du GdR RO et du GdR MACS, co-animé par Laurent Deroussi, Patrick Siarry et El Ghazali Talbi, portent sur cette thématique.
- l'utilisation d'une ou de plusieurs métaheuristiques pour la résolution d'un problème clairement identifié, direction prise par mes travaux de recherche. Les travaux de nombreux groupes de travail du GdR RO et du GdR MACS utilisent des métaheuristiques, dont le groupe Origin co-animé par David Lemoine, Marie-Ange Manier et moi-même.

Mes travaux de recherche sont réalisés en étroite collaboration avec Laurent Deroussi mêlant ainsi ces deux directions.

Ces dernières années, nous assistons à une explosion du nombre de nouvelles métaheuristiques, la plupart basées sur des métaphores, utilisant la nature comme source d'inspiration (DRĂGOI et DAFINESCU 2021). Dans son HdR, Laurent Deroussi a d'ailleurs prévu de constituer un bestiaire des métaheuristiques, de la métaphore du vautour égyptien (SUR et al. 2013) au modèle de propagation du virus du COVID19 (MARTÍNEZ-ÁLVAREZ et al. 2020).

Pour faire face à cette diversité, de nombreuses classifications, plus ou moins complexes, des métaheuristiques ont été proposées. Par exemple, récemment, (STEGHERR et al. 2022) ont proposé un système de classification unifié selon 6 niveaux permettant d'identifier, entre autres, la structure générale et le comportement, les capacités d'intensification et de diversification, l'utilisation de composants basiques des métaheuristiques, les caractéristiques spécifiques. En proposant ce système de classification, les auteurs indiquent vouloir résoudre trois problèmes principaux : organiser l'énorme ensemble de métaheuristiques existantes, clarifier l'innovation dans les nouvelles métaheuristiques et identifier les métaheuristiques appropriées pour résoudre des tâches d'optimisation spécifiques.

Nous préférons rester sur une classification selon deux grandes familles :

- les métaheuristiques à trajectoire : recherche locale, recuit simulé, descente stochastique, recherche locale itérée, tabou, ...
- les métaheuristiques à population : algorithme génétique, optimisation par essaim particulière, colonies de fourmis, ...

J'ai une très nette préférence pour les métaheuristiques à trajectoire (ou basée sur un individu) telles que le **recuit simulé** ou la **recherche locale itérée** pour diverses raisons :

- la principale raison est la simplicité de mise en oeuvre et de paramétrage. Ces méthodes sont généralement simples, faciles à implémenter, robustes et ont fait leur preuve dans la résolution de problèmes d'optimisation difficiles. Des travaux permettent de définir simplement la température initiale et le facteur de sa décroissance dans un recuit simulé (KIRKPATRICK et al. 1982) ou la longueur du palier d'une recherche locale (FLEURY 1993),
- la seconde raison a été souvent motivée par le temps de calcul long nécessaire pour évaluer un individu : modèle de simulation, plusieurs répliques d'un modèle de simulation stochastique, modèle markovien,
- la dernière raison est plus personnelle : mes tentatives pour utiliser des métaheuristiques à population m'ont peu convaincue ce qui a entraîné une certaine réticence. Cependant, lors de la thèse de Fazia Aïboud (AIBOUD 2013), nous avons proposé, avec succès, des algorithmes génétiques pour le paramétrage d'automate cellulaire. Nous nous sommes également intéressés à l'optimisation par essaim particulière pour la planification de ressources dans un réseau de soins dans la thèse de Nathalie Klément (KLEMENT 2014).

Comparées à des méthodes «exactes», les métaheuristiques ont également pour avantage :

- leur capacité à pouvoir manipuler de grandes masses de données, plutôt que de devoir agréger des données ou simplifier un modèle afin d'obtenir un problème solvable mais qui ne représenterait que partiellement la réalité.
- leur capacité à prendre en compte les incertitudes, à pouvoir étudier plusieurs scénarii, plutôt que de proposer une solution exacte à partir d'un modèle dont la plupart des données sont des estimations.

Nous considérons que pour proposer une métaheuristique à trajectoire pour un problème d'optimisation, il convient de définir :

- une **représentation d'une solution**. Cette représentation peut être **directe**, c'est à dire correspondre exactement à une solution du problème étudié, par exemple, l'affectation des objets aux boîtes dans un problème de bin-packing. Dans le cas contraire, la représentation est **indirecte** et nécessite l'utilisation d'une autre méthode pour construire une solution, à partir de cette représentation. Par exemple, une séquence d'objets (ou une liste de priorité) pour le problème du bin-packing ne constitue pas une solution au problème et nécessite un algorithme de construction d'une solution.
- un **système de voisinage** qui permet d'explorer l'espace des représentations des solutions. Nous avons opté pour une exploration aléatoire grâce à l'utilisation de un ou plusieurs mouvements (insertion par exemple).
- une **fonction d'évaluation** permettant de comparer deux solutions. Algorithmiquement, cette fonction s'utilise sous la forme $H(X) \leq H(Y)$ mais il peut s'avérer que le simple calcul ou l'évaluation de la fonction $H(X)$ ne suffit pas et plusieurs critères doivent être définis pour être suffisamment discriminants.

1.2.2 Hybridation : quelques définitions

Une fois les éléments ci-dessus définis, il peut s'avérer nécessaire de compléter la métaheuristique par un modèle ou une méthode complémentaire. Ainsi, ces dernières années, de nombreuses méthodes, dépassant le cadre de la simple métaheuristique, ont été développées.

Une première définition

Pendant ma thèse (au siècle dernier...), le terme «couplage» était fréquemment utilisé et qualifiait généralement l'appel à un modèle d'évaluation des performances à l'intérieur d'une métaheuristique pour évaluer le ou les critères de performance d'une solution.

Cet usage a ensuite un peu évolué et d'après (NORRE 2005), un «*couplage de deux méthodes M1 et M2 est défini comme la mise en œuvre de la méthode M2 dans la méthode M1.*». Si M1 est une métaheuristique et M2 une heuristique, le couplage de M1 et M2 consiste à utiliser l'heuristique à chaque itération de la métaheuristique pour améliorer la solution courante. Si M2 est une modèle de simulation, le couplage de M1 et M2 consiste à utiliser le modèle de simulation pour construire une solution (par exemple déterminer les dates de début des tâches dans un problème d'ordonnement) et obtenir le ou les critères de performance.

Une seconde définition

Ensuite, le terme «métaheuristique hybride» est apparu pour qualifier le «couplage entre deux métaheuristicues» ou entre une métaheuristique et une heuristique. Selon le Larousse, **hybride** est à la fois un adjectif et un nom masculin et se définit par :

1. *Se dit d'un animal issu du croisement entre des lignées sélectionnées et plus ou moins consanguines à l'intérieur d'une même espèce.*
2. *Se dit d'une plante issue du croisement entre des parents nettement différents, appartenant à la même espèce (croisement entre lignées) ou à des espèces voisines (hybrides interspécifiques).*
3. *Qui est composé d'éléments disparates : Une architecture hybride.*

Au début, les hybridations, n'étaient pas si populaires car elles touchaient des communautés de chercheurs relativement séparées. C'est grâce aux théorèmes du "No free lunch" (D. WOLPERT 1997) que cette situation a évolué et il a été reconnu que pour résoudre efficacement un problème, il ne faut pas hésiter à utiliser toutes les méthodes ou techniques à notre disposition.

Dans sa taxonomie, (TALBI 2002) propose une classification hiérarchique des métaheuristicues hybrides selon deux critères :

- le niveau d'imbrication qui définit comment les méthodes sont reliées entre elles. Dans une hybridation de bas-niveau (Low-level), une des méthodes est utilisée comme composant d'une autre méthode. Dans une hybridation de haut-niveau (High-level), les méthodes sont indépendantes les unes des autres, dans le sens où aucune d'elles n'intervient dans le fonctionnement interne d'une autre.
- le niveau de coopération qui définit comment les méthodes travaillent ensemble. Dans une hybridation de type séquentiel (Relay), les méthodes sont utilisées les unes à la suite des autres, les sorties d'une méthode servant d'entrées pour la méthode suivante. Dans une hybridation de type coopératif (Teamwork), les méthodes agissent comme des agents qui parcourent l'espace de recherche de manière indépendante puis coopèrent en mettant en commun le fruit de leur recherche.

Quatre classes sont dérivées de cette classification :

- LRH (Low-level Relay Hybrid) : regroupe les algorithmes dans lesquels une métaheuristique à trajectoire est incorporée dans une autre métaheuristique à trajectoire. Par exemple, une méthode de Recherche Locale introduite dans un algorithme de Recuit Simulé.
- LTH (Low-level Teamwork Hybrid) : regroupe les algorithmes dans lesquels un algorithme de recherche locale (pour l'intensification) est incorporé dans une métaheuristique à population (pour la diversification). Par exemple, remplacer l'opérateur de mutation d'un Algorithme Génétique par une méthode de Recherche Locale.

- HRH (High-level Relay Hybrid) : des métaheuristiques complètes sont exécutées séquentiellement. Dans cette classe, toutes les méthodes gardent leur intégrité. Par exemple, les solutions d'un algorithme à population sont données comme solution de départ d'un algorithme de recherche locale.
- HTH (High-level Teamwork Hybrid) : regroupe l'ensemble de métaheuristiques qui travaillent en parallèle et coopèrent pour trouver la solution optimale d'un problème. Le principe consiste à échanger des informations au cours de l'exécution afin de trouver la solution optimale du problème posé.

Plus récemment, (BLUM et al. 2011) définit une métaheuristique hybride comme un algorithme hybride «*combining components from several different optimization techniques. Hereby, hybridization is not restricted to the combination of different metaheuristics but includes, for example, the combination of exact algorithms and metaheuristics.*»

Ces dernières années, les métaheuristiques hybrides ont soulevé un intérêt grandissant. (BLUM et al. 2011) et (TALBI 2013) listent plusieurs types d'hybridation de métaheuristiques :

- avec des heuristiques ou des métaheuristiques,
- avec des approches basées sur la programmation par contraintes,
- avec des techniques de recherche arborescente,
- avec des relaxations du problème,
- avec la programmation dynamique,
- avec des méthodes exactes utilisant la programmation mathématique,
- avec des techniques de machine learning et de data mining.

Ces combinaisons mêlent plusieurs communautés : recherche opérationnelle, intelligence artificielle, données, ...

Une troisième définition

Lorsque la métaheuristique est hybridée avec un algorithme de programmation mathématique (PM) également appelé algorithme exact dans la littérature, le terme de **matheuristique** est utilisée. On peut ainsi rencontrer des métaheuristiques définies ou améliorées par des techniques de PM, ou des métaheuristiques accélérant des algorithmes de PM.

Le terme matheuristique date des années 2005 ou 2006, mais le principe a été développé dans les années 1990. (PUCHINGER et RAIDL 2005) dresse une classification des matheuristiques permettant de comprendre l'éventail des hybridations (ou combinaisons) possibles.

Combinaison collaborative : les algorithmes échangent des informations, mais ne font pas partie l'un de l'autre. Les algorithmes exacts et la métaheuristique peuvent être exécutés de manière séquentielle, entrelacée ou en parallèle.

- Exécution Séquentielle : l'algorithme de PM est exécuté comme une sorte de prétraitement avant la métaheuristique ou l'inverse.
- Exécution Parallèle ou Entrelacée : au lieu d'une approche strictement séquentielle, les algorithmes exacts et les métaheuristiques peuvent également être exécutés en parallèle ou entrelacés. D'après les auteurs, cette combinaison se rencontre surtout dans des approches multi-agents où chaque agent résout un sous-problème.

Combinaison intégrative : un algorithme est un composant subordonné et intégré dans l'autre algorithme. On peut alors parler d'algorithme maître et d'algorithme esclave.

- Algorithmes exacts incorporés dans les métaheuristiques : l’algorithme exact est utilisé par la métaheuristique pour la résolution d’un problèmes relaxé, pour la construction d’une solution à partir d’une représentation ou pour la recherche d’un meilleur voisin dans un voisinage.
- Métaheuristiques incorporées dans les algorithmes exacts : l’algorithme exact fait appel à la métaheuristique pour l’obtention de bornes, pour la génération de colonnes et de coupes ou pour choisir une stratégie d’exploration.

Ce type d’hybridation soulève actuellement un grand intérêt comme le montre le nombre de publications sur le sujet (BOSCHETTI et MANIEZZO 2022, MANIEZZO et al. 2021).

Dans nos travaux, nous avons utilisé des combinaisons intégratives dans lesquelles les métaheuristiques sont maîtres et les algorithmes exacts sont esclaves.

Et une dernière

Les définitions se rejoignent à la différence près que le couplage tel que défini par (NORRE 2005) considère à la fois des méthodes d’optimisation et des modèles d’évaluation des performances. En effet, lorsque l’évaluation d’une solution et sa comparaison avec une autre solution n’est pas aisée à calculer, il peut être nécessaire de faire appel à un modèle d’évaluation des performances plus ou moins complexe. Ainsi, pendant ma thèse, j’ai proposé des couplages entre des métaheuristiques et des modèles d’évaluation des performances pour les problèmes de Flow-Shop, Flow-Shop Hybride en contexte déterministe et en contexte stochastique.

Dans mes travaux de recherche, l’idée est de proposer des représentations de solution qui vont au delà de la représentation directe et nécessitent l’utilisation d’autres méthodes ou modèles.

Afin de clarifier tout cela, dans nos travaux, nous considérons que :

- un **couplage** (figure 1.2) est défini entre une méthode d’optimisation et un modèle d’évaluation des performances. Dans ce cas, la représentation de la solution est directe et le modèle d’évaluation des performances se contente de retourner la solution (décrivant les dates de début des tâches par exemple) et le ou les critères de performances.

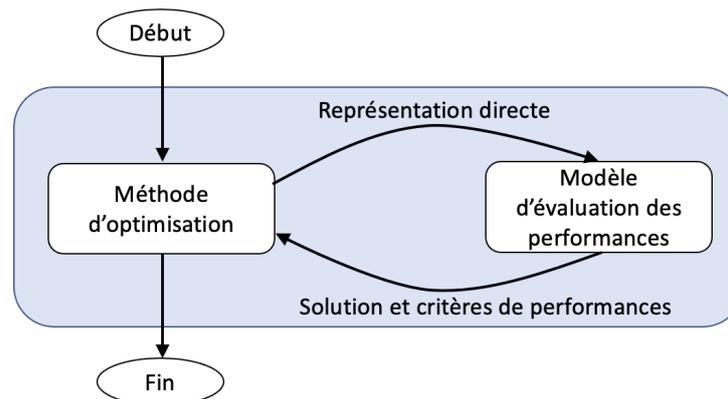


FIGURE 1.2 – Couplage

Par exemple, nous avons proposé :

- un couplage (Métaheuristique \rightleftharpoons Modèle markovien) pour le problème du Flow-Shop stochastique (GOURGAND, GRANGEON et NORRE 2005) ,

- un couplage (Métaheuristique \rightleftharpoons Modèle de simulation à événements discrets) pour un problème d’ordonnancement d’activités de livraison-collecte pour le CHRU de Clermont-Ferrand (ANDRÉ, GRANGEON, NORRE et PHILIPPE 2011a).
- une **hybridation** (figure 1.3) est définie entre deux méthodes d’optimisation. Dans le cas d’une hybridation (Métaheuristique \rightleftharpoons Méthode d’optimisation), la représentation de la solution est indirecte et la méthode d’optimisation est utilisée pour construire une solution au problème d’optimisation.

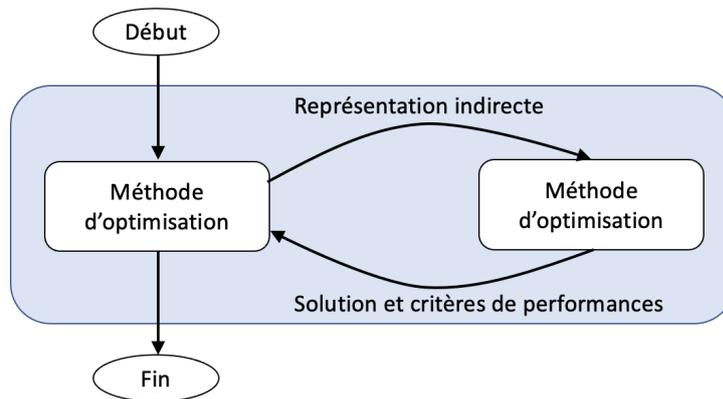


FIGURE 1.3 – Hybridation

Par exemple, nous avons proposé :

- une hybridation (Métaheuristique \rightleftharpoons Algorithme de liste de type SGS (Sérial Generation Scheme)) pour un problème de RCPSP multi-sites (LAURENT et al. 2017b),
- une hybridation (Métaheuristique \rightleftharpoons Modèle de programmation linéaire) pour un problème de planification de la chaîne logistique PSA (GOURGUECHON et al. 2010b),
- une hybridation (Métaheuristique \rightleftharpoons Algorithme de programmation dynamique) pour le Parallel Drone Scheduling Traveling Salesman Problem (PDSTSP) (MBIADOU SALEU et al. 2018).

1.3 Thématiques principales

Comme dit dans l’introduction, mes travaux de recherche concernent principalement la proposition de métaheuristicues ou d’hybridation pour la résolution de problèmes d’optimisation combinatoire selon trois thèmes principaux :

- des problèmes d’ordonnancement d’activités dans un environnement multi-sites,
- des problèmes de voyageur de commerce multiples avec contraintes de synchronisation d’une part et deux types de véhicules d’autre part,
- des problèmes d’équilibrage et de rééquilibrage de lignes d’assemblage.

Les trois sections qui suivent présentent une synthèse des travaux réalisés sur ces thématiques. L’objectif n’est pas de détailler l’ensemble des contributions mais plutôt d’en donner une vue d’ensemble en précisant les collaborations et les publications majeures issues de ces travaux. La liste complète des publications est donnée dans le curriculum vitae. Nous renvoyons le lecteur aux trois chapitres suivant pour une présentation détaillée des principales métaheuristicues, couplages et hybridations proposés pour chaque thématique.

1.3.1 Ordonnancement d'activités dans un environnement multi-sites

Durant ma thèse, je me suis intéressée au problème d'ordonnancement dans un Flow-Shop Hybride (FSH) pour lequel j'ai proposé un environnement logiciel de modélisation et d'optimisation dans un contexte déterministe et un contexte stochastique. Cet environnement intègre des modèles pour l'évaluation des performances et des méthodes pour la résolution de problèmes de dimensionnement, de compréhension du fonctionnement interne et d'optimisation.

Après ma thèse, j'ai poursuivi mes travaux sur le problème d'évaluation des performances et d'ordonnancement du Flow-Shop stochastique en généralisant les propositions faites pendant la thèse. Par Flow-Shop stochastique, nous entendons un Flow-Shop avec des temps de traitement des tâches modélisés par des variables aléatoires. Le cas de la loi exponentielle a été plus particulièrement étudié. Le critère de performance considéré est l'espérance mathématique du makespan qui dans certains cas peut être calculée et dans d'autre cas seulement évaluée. Nous avons ainsi étendu le modèle markovien pour un Flow-Shop à 2 machines proposé par (CUNNINGHAM et DUTTA 1973) au Flow-Shop à M machines avec des stocks de capacité illimitée, limitée ou nulle.

Mes travaux de recherche se sont ensuite tournés vers le problème d'ordonnancement de projet avec contraintes de ressources (Resource Constrained Project Scheduling Problem - RCPSP) qui constitue une généralisation des problèmes d'atelier et d'ordonnancement.

Planification d'activités

Le contexte de ces travaux est la mutualisation de ressources hospitalières au sein d'un territoire et plus particulièrement dans une Communauté Hospitalière de Territoire (CHT) dans laquelle il s'agit d'organiser des tâches nécessitant des ressources humaines et matérielles situées sur plusieurs sites géographiques. Différents problèmes d'optimisation ont été définis en fonction du niveau de décision : stratégique, tactique ou opérationnel, et du niveau de modélisation : macroscopique, mesoscopique et microscopique.

Dans le cadre du co-encadrement de la **thèse de Nathalie Klement**, nous nous sommes intéressés à des problèmes de dimensionnement, de planification et d'ordonnancement à un niveau de décision stratégique/tactique. Nous avons notamment défini des problèmes de planification d'activités avec affectation de ressources de complexité croissante selon les hypothèses sur la capacité des ressources humaines :

1. les ressources humaines sont à capacité infinie,
2. les ressources humaines sont à capacité limitée et leur affectation sur site est une donnée,
3. les ressources humaines sont à capacité limitée et leur affectation sur site est à déterminer.

Pour chaque problème, une **modélisation mathématique** sous la forme d'un programme linéaire en nombres entiers a été proposée et un lien avec le problème du Bin-Packing a été identifié. Le problème 1. a été identifié comme un problème de Bin-Packing 1D, le problème 2. est modélisé par un problème du Bin-Packing 1D avec interdépendances et le problème 3. a été modélisé par un Bin-Packing 1D avec incompatibilités.

Des **hybridations (Métaheuristique \rightleftharpoons Heuristique)** ont été proposées pour les problèmes du bin packing identifiés. Les métaheuristicues utilisées sont des métaheuristicues basées individu (Recuit Simulé et Recherche Locale Itérée) et une métaheuristique basée population (Optimisation par Essaim Particulaire). La représentation d'une solution est inspirée des problèmes d'ordonnancement de permutation et deux stratégies d'exploration ont été mises en œuvre, l'une explorant l'ensemble de toutes les solutions (admissibles et non admissibles) et l'autre explorant uniquement l'espace des solutions admissibles.

Les hybridations proposées se sont révélées simples à utiliser pour les 3 problèmes identifiés. Les contraintes d'interdépendance et d'incompatibilité ont été prises en compte au niveau des heuristiques.

Pour les instances de taille réaliste, les résultats obtenus par les hybridations sont très prometteurs : les solutions obtenues sont meilleures que la borne supérieure retournée par le solveur lors de la résolution du modèle mathématique. Il est envisageable d'adapter cette méthode sur d'autres problèmes plus complexes par intégration dans l'heuristique des nouvelles contraintes.

RCPSP multi-sites

Dans la continuité des travaux de Nathalie Klément, nous nous sommes intéressés au niveau de décision opérationnel. Dans le cadre du co-encadrement de la **thèse d'Arnaud Laurent**, nous avons été amenés à modéliser le problème rencontré dans une CHT par une extension du RCPSP intégrant un aspect multi-sites.

Le principe de cette extension est de considérer un ensemble de sites sur lesquels des tâches seront exécutées. Les ressources sont différenciées en deux catégories :

- les ressources fixes, qui sont assignées à un site et qui peuvent être affectées uniquement à des tâches affectées au même site qu'elles.
- les ressources mobiles, qui peuvent être affectées à n'importe quelle tâche sur n'importe quel site. Cependant l'affectation d'une ressource mobile à deux tâches affectées à deux sites différents entraîne un temps de transport de la ressource.

L'objectif est de déterminer sur quel site chaque tâche sera exécutée et à quelle date. Pour cela des ressources mobiles peuvent être transférées d'un site à un autre. Des temps de déplacement vont ainsi s'appliquer en cas de transfert de ressources entre deux sites et en cas de réalisation sur deux sites différents de deux tâches reliées par une contrainte de précédence.

Deux modélisations mathématiques sous la forme de programmes linéaires en nombres entiers ont été proposées : un modèle reprenant les contraintes cumulatives du RCPSP et un modèle individualisant l'affectation des ressources.

Trois hybridations utilisant une métaheuristique ont été proposées. Pour cela, trois représentations de solution ont été proposées :

- (σ) se limitant à une permutation de tâches,
- (σ, A) complétant (σ) par un vecteur (A) d'affectation des tâches aux sites,
- (σ, A, B) complétant (σ, A) par un vecteur (B) d'affectation des tâches aux ressources.

Pour chaque représentation, un algorithme d'ordre strict (Schedule Generation Scheme) a été défini. L'algorithme pour construire une solution à partir de (σ) prend toutes les décisions d'affectation à l'aide de règles de gestion simples alors que l'algorithme construisant une solution à partir de (σ, A, B) ne prend aucune décision et se contente de calculer les dates de début des tâches.

Trois mouvements ont été définis pour chaque partie de la représentation d'une solution permettant ainsi l'exploration de l'espace des solutions admissibles. L'espace des solutions représentées par (σ) présente l'intérêt d'être le plus restreint mais nous avons montré que les représentations (σ, A) et (σ) ne garantissent pas l'accessibilité à une solution optimale à cause de l'algorithme de construction d'une solution.

Le lecteur intéressé pourra se référer au chapitre 2 pour plus de détails sur les **hybridations (Métaheuristiques \Leftrightarrow SGS)** proposées pour le RCPSP multi-sites.

Ordonnancement d'activités de livraison-collecte

Dans les années 2010, le Centre Hospitalier Universitaire (CHU) de Clermont-Ferrand a connu une profonde mutation autour de la construction d'un nouvel hôpital (Hôpital Estaing) qui s'est accompagnée de la réorganisation des services de soins, la fermeture d'un hôpital, la centralisation de la production des repas, du nettoyage du linge, de la pharmacie et la prestation de services auprès d'établissements partenaires. Dans le cadre du co-encadrement de la **thèse de Virginie André** et d'une **collaboration avec le CHU de Clermont-Ferrand**, nous nous sommes intéressés à l'organisation des flux logistiques de produits hôteliers (repas et linge) et des médicaments en considérant trois problèmes de complexité croissante (figure 1.4).

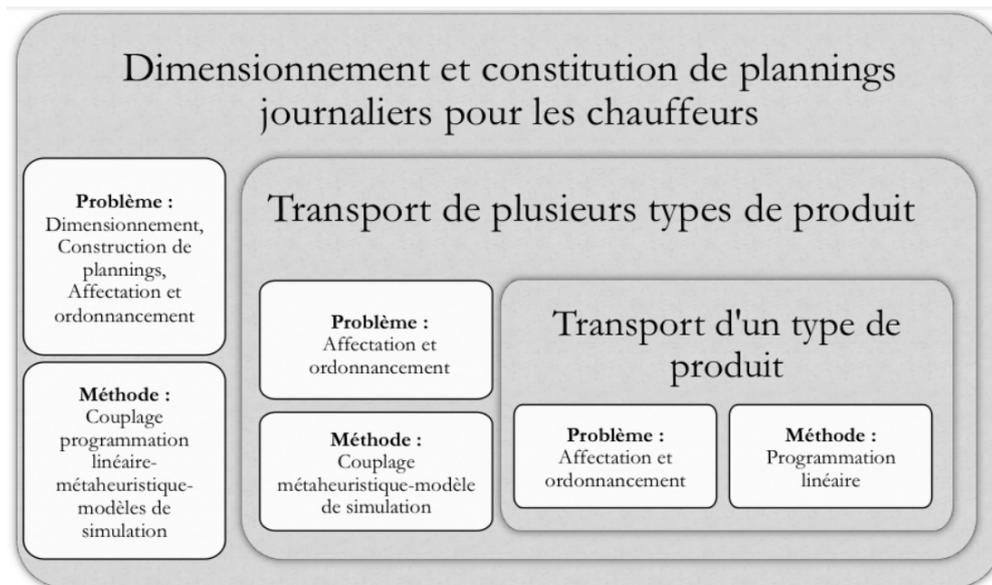


FIGURE 1.4 – 3 problèmes étudiés pendant la thèse de Virginie André

Transport d'un type de produit Au départ, l'étude portait sur le dimensionnement des véhicules pour le transport des repas entre l'Unité Centrale de Production des Repas et les établissements composant le CHU. Le problème est modélisé comme un RCPSP avec profil de demande en ressources variable. Les transports à vide sont modélisés comme des temps de montage dépendant de la séquence.

Deux programmes linéaires en nombres entiers ont été proposés. Le premier découpe la journée en 4 problèmes indépendants : la livraison des armoires de repas du midi, la collecte des armoires après consommation du midi, la livraison des armoires de repas du soir, la collecte des armoires après consommation du soir. Le second intègre les 2 types de transport (livraison et collecte, midi et soir).

L'examen des organisations obtenues a montré la nécessité de s'intéresser aux autres types de produit pour lesquels des ressources communes (quais de chargement et de déchargement par exemple) doivent être prises en compte.

Transport de plusieurs types de produit L'objectif est de proposer une organisation permettant de réaliser l'ensemble des transports de repas, de médicaments et du linge tout en minimisant les retards et les heures supplémentaires. La construction du modèle de connaissances a montré la diversité des ressources à prendre en compte (véhicule, chauffeur, quai de chargement, de déchargement, contenant, ligne de production, aire de nettoyage) et des contraintes (incompatibilité véhicule/contenant, date de début au plus tôt, date de fin souhaitée, planning de travail). Le problème présente une double complexité qui est résolue par un **couplage (métaheuristique \Leftrightarrow modèle de simulation)**.

Deux représentations de solution ont été envisagées :

- (σ) : une permutation d'activités.
- $(\sigma_{(1)}, \sigma_{(2)}, \dots, \sigma_{(M)})$: une permutation d'activités pour chaque chauffeur.

Pour les deux représentations, un modèle de simulation est utilisé pour déterminer l'affectation des activités aux ressources (en dehors des chauffeurs pour la seconde représentation) et la date de début de chaque activité. Avec la représentation (σ) , les résultats obtenus étaient de très mauvaise qualité et il nous est apparu nécessaire de travailler sur une représentation permettant d'affecter les activités aux chauffeurs et de déléguer l'affectation des autres ressources au modèle de simulation. Deux mouvements ont été définis : insertion et échange soit au sein de la permutation des activités d'un chauffeur soit entre les permutations d'activité de deux chauffeurs.

Dimensionnement et constitution des plannings journaliers des chauffeurs Les résultats obtenus nous ont amenés à remettre en cause des plannings de travail des chauffeurs. Pour résoudre le problème, une approche itérative incluant un modèle de simulation, un programme linéaire en nombres entiers et le couplage proposé pour le problème précédent.

A partir d'une journée découpée en périodes de 30 minutes, le modèle de simulation a pour objectif de déterminer le besoin, en nombre de chauffeurs, pour chaque période. Le programme linéaire en nombres entiers construit alors des plannings de travail répondant au mieux à ce besoin. La faisabilité des plannings est établie par le couplage (métaheuristique \rightleftharpoons modèle de simulation). Si une solution peut être construite, alors le processus PLNE \rightarrow (métaheuristique \rightleftharpoons modèle de simulation) est itéré avec un chauffeur de moins.

Le lecteur intéressé pourra se référer au chapitre 2 pour plus de détails sur le couplage (métaheuristique \rightleftharpoons modèle de simulation) proposé.

Synthèse des contributions et placement dans le temps

Le tableau 1.1 et la figure 1.5 présentent une synthèse des contributions et des publications majeures pour cette thématique.

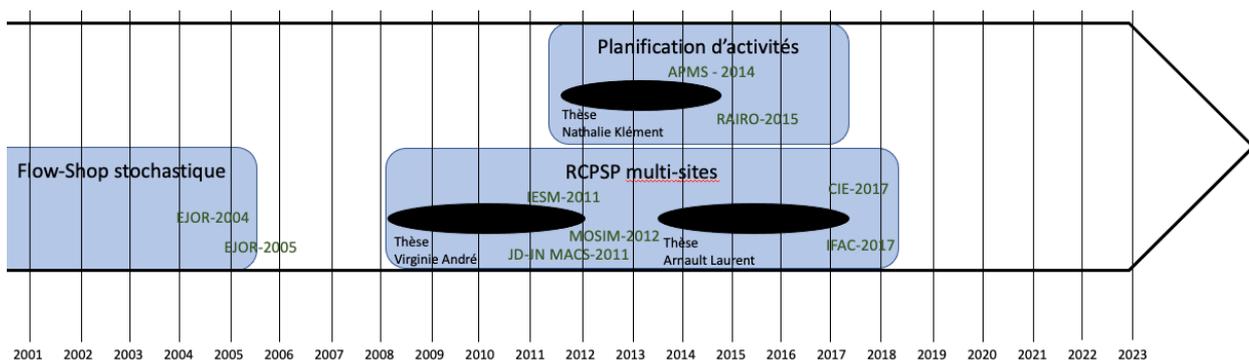


FIGURE 1.5 – Frise chronologique des travaux réalisés sur la thématique «Ordonnancement»

Problème	Revue ou conférence	Contenu - Référence
Flow-Shop Stochastique	Revue EJOR	(Métaheuristique \Leftrightarrow Modèle markovien) et (Métaheuristique \Leftrightarrow Modèle de simulation) pour le Flow-Shop stochastique à M machines et des stocks de capacité illimitée (GOURGAND, GRANGEON et NORRE 2004)
	Revue EJOR	(Métaheuristique \Leftrightarrow Modèle markovien) pour le Flow-Shop stochastique à M machines et des stocks de capacité quelconque (GOURGAND, GRANGEON et NORRE 2005)
Planification d'activités	Revue RAIRO	3 modélisations mathématiques (GOURGAND, GRANGEON et KLEMENT 2015)
	Conférence APMS	(Métaheuristique \Leftrightarrow Heuristique) (GOURGAND, GRANGEON et KLEMENT 2014)
RCPS multi-sites	Revue CIE	2 modélisations mathématiques (LAURENT et al. 2017a)
	Conférence IFAC	(Métaheuristiques \Leftrightarrow SGS) (LAURENT et al. 2017b)
Ordonnancement d'activités de livraison-collecte	Conférence MOSIM	2 modélisations mathématiques pour le problème de transport d'un seul type de produit (ANDRÉ, GRANGEON, NORRE et PHILIPPE 2012)
	Conférence IESM	(Métaheuristique \Leftrightarrow Modèle de simulation) pour le problème de transport de plusieurs types de produit (ANDRÉ, GRANGEON, NORRE et PHILIPPE 2011a) (ANDRÉ, GRANGEON et NORRE 2013)
	Conférence JD-JN MACS	(Modèle de simulation \rightarrow (PLNE \Leftrightarrow (Métaheuristique \Leftrightarrow Modèle de simulation))) pour le problème de dimensionnement et de constitution des plannings des chauffeurs (ANDRÉ, GRANGEON, NORRE et PHILIPPE 2011b)

TABLE 1.1 – Principales publications en lien avec les problèmes d'ordonnancement

1.3.2 Extensions du problème de voyageur de commerce multiple

Le second thème concerne des extensions du problème de voyageur de commerce multiple (m-TSP). Dans la première, la notion de la présence de deux voyageurs au même moment entraîne des contraintes de synchronisation alors que dans la seconde, le type de voyageur influe sur les temps de trajet et les clients qui peuvent être visités.

Contraintes de synchronisation et fenêtres de temps

Dans le cadre du co-encadrement de la thèse de Fabrice Gayraud et d'une collaboration avec l'hôpital de Montluçon, nous nous sommes intéressés à la problématique d'organisation des tournées de soins à domicile dans le cadre de structures de maintien à domicile comme par exemple

les service d'Hospitalisation à Domicile ou les Services de Soins Infirmiers à Domicile. Les soins sont prodigués au domicile des patients par un ou deux soignants d'un type défini, comme médecin ou infirmier par exemple pendant une période de disponibilité du patient. Le patient est caractérisé par un niveau de dépendance et peut exprimer une préférence pour être soigné par un soignant plutôt qu'un autre. L'objectif est de construire les tournées des soignants en rendant visite à tous les patients tout en minimisant la longueur (ou durée) des tournées, en équilibrant les tournées suivant le niveau de dépendance des patients et en favorisant la préférence des patients. Des contraintes de synchronisation sont induites par la nécessité d'avoir deux soignants présents au même moment auprès de certains patients.

Nous avons proposé **deux modélisations mathématiques** du problème sous la forme d'un multiple Traveling Salesman Problem avec fenêtres de temps (m-TSPTW) auquel s'ajoutent des contraintes spécifiques comme la synchronisation d'activités ou la prise en compte de types de ressource et des critères de performance propres au problème (équilibre et préférence). La différence entre les deux modèles réside dans la modélisation de l'équilibrage des tournées suivant le niveau de dépendance des patients (comme critère ou comme contrainte).

Nous avons ensuite proposé un **couplage (métaheuristique \rightleftharpoons modèle de simulation)** et une **hybridation (Métaheuristique \rightleftharpoons Algorithme d'ordonnancement de projet)**. Le couplage (métaheuristique \rightleftharpoons modèle de simulation) repose sur une représentation directe d'une solution sous la forme d'une permutation de sommets à visiter (σ) et la construction des tournées est prise en charge par un modèle de simulation. Cette approche n'a pas donné de résultats concluants et nous nous sommes orientés vers une représentation très proche de la représentation $(\sigma_{(1)}, \sigma_{(2)}, \dots, \sigma_{(M)})$ proposée pour l'ordonnancement d'activités de livraison-collecte. La différence réside dans le fait qu'une activité peut apparaître dans plusieurs permutations pour matérialiser la contrainte de synchronisation. Les mêmes mouvements ont été utilisés (échange ou insertion, inter-tournée ou intra-tournée). Chaque nouvelle représentation construite est représentée par un graphe et l'absence de circuit dans le graphe permet de vérifier que les contraintes synchronisation sont bien respectées. L'algorithme de construction d'une solution est basé sur une adaptation de la méthode MPM pour l'ordonnancement de projet et permet de vérifier les contraintes de fenêtres de temps.

L'hybridation (Metaheuristique \rightleftharpoons Algorithme d'ordonnancement de projet) a été testée sur des instances de la littérature d'un problème proche du nôtre et nous avons amélioré les résultats de la littérature.

Le lecteur intéressé pourra se référer au chapitre 3 pour plus de détails sur les hybridations proposées.

Prise en compte de deux types de véhicules pour la logistique du dernier kilomètre

Nous avons considéré des systèmes de livraison composés de véhicules classiques et de drones travaillant indépendamment (sans synchronisation) à partir d'un dépôt. Le problème consiste à répartir les clients entre les véhicules et les drones en respectant la charge utile limitée et la portée de vol des drones et à ordonner les livraisons pour les véhicules, les drones effectuant des aller-retours entre le dépôt et les clients.

La croissance de la livraison du dernier kilomètre et de la demande de service rapide poussent la logistique au-delà de la gestion traditionnelle des transports et de l'analyse de la chaîne d'approvisionnement. Une évolution récente de la logistique urbaine implique l'utilisation de véhicules aériens sans pilote à bord ou drones dans le processus de livraison. La livraison par drones offre de nouvelles possibilités mais induit également de nouveaux problèmes de routage complexes. Les propositions de scénario pour la livraison par drone varient considérablement, les drones étant utilisés indépendamment ou en conjonction avec la livraison par camions.

Dans le cadre du co-encadrement de la **thèse de Raïssa Saleu**, nous avons abordé un scénario de livraison véhicule-drone dans lequel un ou plusieurs drones travaillent avec un ou plusieurs véhicules de livraison traditionnels pour distribuer des colis aux clients depuis un dépôt. Le(s) véhicule(s) et le(s) drone(s) servent différents groupes de clients en parallèle. Un véhicule sert un sous-ensemble de clients avec un tour unique partant du dépôt et retournant au dépôt tandis qu'une livraison par drone implique un arrêt unique, le drone faisant des allers-retours entre le dépôt et les emplacements des clients. L'objectif est de minimiser l'heure à laquelle tous les véhicules et drones sont de retour au dépôt, tous les clients ayant été servis.

Ce problème est appelé Parallel Drone Scheduling Traveling Salesman Problem (PDSTSP) lorsqu'un seul véhicule est disponible pour livrer. Quand il y a plusieurs véhicules, le problème est intitulé Parallel Drone Scheduling Multiple Traveling Salesman Problem (PDSMTSP).

Des **modélisations mathématiques** sous la forme de programme linéaire en nombres entiers pour les deux problèmes ont été proposées et des algorithmes simples de type Branch-and-Cut sont utilisés pour la résolution.

Sur le principe de l'approche Route First - Cluster Second de (BEASLEY 1983), nous avons proposé une **hybridation (Métaheuristique \Leftrightarrow Programmation dynamique)**. Une solution est représentée par une séquence de clients et la construction de la solution consiste à décomposer la séquence de clients en un tour pour le véhicule et un sous-ensemble de clients affectés aux drones. Cette construction est exprimée comme un problème de plus court chemin bicritère et est réalisée par la programmation dynamique. Des expériences menées sur des instances de référence tirées de la littérature (de 10 et 20 clients) et de nouvelles instances plus grandes générées à partir de la TSPLIB confirment l'efficacité de l'approche et les résultats permettent une nette amélioration par rapport à la littérature existante.

Cette approche a été étendue au PDSMTSP.

Le lecteur intéressé pourra se référer au chapitre 3 pour plus de détails sur l'hybridation (Métaheuristique \Leftrightarrow Programmation dynamique) pour le PDSTSP.

Synthèse des contributions et placement dans le temps

Le tableau 1.2 et la figure 1.6 présentent une synthèse des contributions et des publications majeures pour cette thématique.

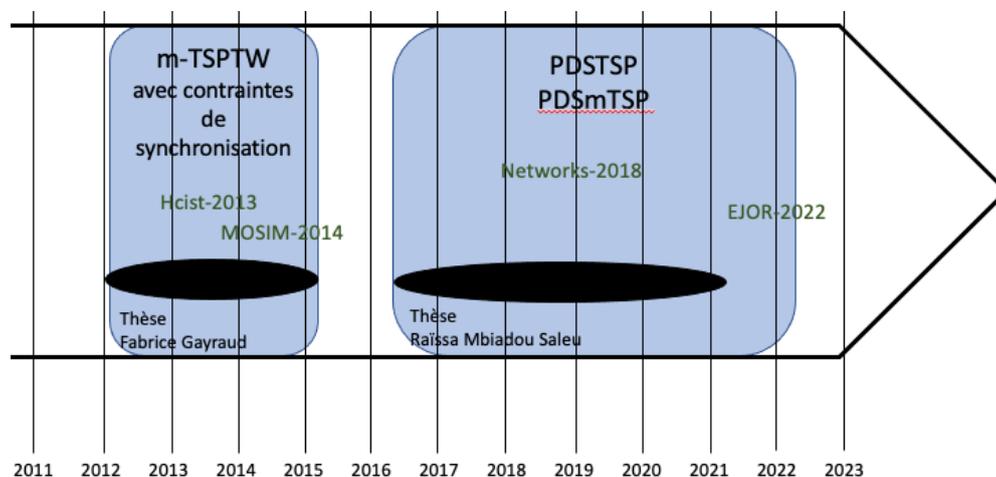


FIGURE 1.6 – Frise chronologique des travaux réalisés sur la thématique «m-TSP»

Problème	Revue ou conférence	Contenu - Référence
m-TSPTW avec contraintes de synchronisation		
	Conférence HCist	2 modèles mathématiques (GAYRAUD et al. 2013)
	Conférence MOSIM	(Métaheuristique \Leftrightarrow Algorithme d'ordonnancement de projet) (GAYRAUD et al. 2014)
Parallel Drone Scheduling Traveling Salesman Problem		
	Revue Networks	(Métaheuristique \Leftrightarrow Programmation dynamique) (MBIADOU SALEU et al. 2018)
Parallel Drone Scheduling Multiple Traveling Salesman Problem		
	Revue EJOR	(Métaheuristique \Leftrightarrow Programmation dynamique) (MBIADOU SALEU et al. 2022)

TABLE 1.2 – Principales publications en lien avec les extensions du m-TSP

1.3.3 Equilibrage et rééquilibrage de lignes d'assemblage

Le troisième thème concerne les **problèmes d'équilibrage de lignes d'assemblage** (line balancing). Ce problème a été étudié sous trois angles :

- le problème théorique de base de l'équilibrage (SALBP) et quelques variantes,
- le problème d'équilibrage des lignes de transfert et son extension aux lignes robotisées,
- le problème de rééquilibrage de lignes d'assemblage d'un point de vue industriel.

Problème théorique de base de l'équilibrage

Le problème d'équilibrage de ligne d'assemblage (Simple Assembly Line Balancing Problem - SALBP) consiste à affecter des opérations à des stations afin de respecter les contraintes de précédence et de temps de cycle. Dans nos travaux, le temps de cycle est fixé et l'objectif est de minimiser le nombre de stations.

Exploitant le lien entre SALBP et le problème du Bin-Packing 1D, nous avons proposé une **hybridation (Métaheuristique \Leftrightarrow Heuristique)** en adaptant des heuristiques bien connues pour le problème du Bin-Packing 1D. Une solution est représentée par une permutation (σ) d'opérations respectant les contraintes de précédence. Un mouvement de type insertion, respectant les contraintes de précédence a été proposé. Un second mouvement a également été proposé pour éviter de construire une nouvelle représentation conduisant à la même solution que la représentation initiale.

Le critère du nombre de station n'étant pas suffisant pour comparer deux solutions, trois critères d'acceptation, utilisant la charge des stations, ont été définis. Les résultats obtenus ont permis d'améliorer certains résultats de la littérature.

L'hybridation proposée a été étendue au Parallel Assembly Line Balancing Problem (PALBP) puis au Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem dans le cadre du **stage de Master de Safa Mrad**.

Plus récemment, nous avons commencé à intégrer des considérations énergétiques dans les problèmes d'équilibrage. Le problème théorique est le Simple Assembly Line Balancing Problem With Power Peak Minimization (SALB3PM) tel que défini par (GIANESSI et al. 2019). Pour réduire efficacement le pic de consommation, il convient, en complément du problème d'équilibrage, de

s'intéresser à l'ordonnancement des opérations en fixant leur date de début. Cela a pour conséquence de créer des temps morts entre les opérations affectées à une station.

Dans le cadre du **stage de master de Arnauld Tuyaba**, nous avons proposé une hybridation (**Métaheuristique** \Leftrightarrow **Programmation Linéaire**). Une solution est représentée par un équilibrage, c'est à dire une affectation des opérations aux stations et la programmation linéaire est utilisée pour déterminer les dates des opérations qui minimisent le pic de consommation. Les tout premiers résultats sont prometteurs.

Le lecteur intéressé pourra se référer au chapitre 4 pour plus de détails sur les hybridations (Métaheuristique \Leftrightarrow Heuristique) pour le SALBP-1 et le PALBP.

Equilibrage des lignes de transfert

L'automatisation des lignes de production a vu l'émergence d'une nouvelle catégorie de lignes de production : celle des lignes de transfert. Ces lignes sont similaires aux lignes d'assemblage mais intègrent d'autres caractéristiques telles qu'une automatisation complète de la ligne de production à l'aide de machines à commandes numériques qui peuvent être équipées de plusieurs têtes d'usinage et la possibilité de réaliser des opérations symétriques en parallèle.

Dans le cadre du co-encadrement de la **thèse de Youssef Lahrichi**, nous nous sommes intéressés à plusieurs problèmes d'équilibrage dans ce contexte. En particulier, nous avons considéré :

- des temps de montage dépendant de la séquence. Ces temps s'appliquent entre deux opérations consécutives réalisées sur la même station. Le problème d'équilibrage est alors complété par un problème de séquençement afin de s'assurer le respect du temps de cycle.
- des machines dupliquées au sein d'une station. Pendant un temps de cycle, plusieurs produits peuvent être usinés dans la station, mais un seul produit par temps de cycle sort de la station pour passer à la station suivante. Le produit reste donc dans la station la durée du temps de cycle multiplié par le nombre de machines.
- des contraintes d'inclusion, exclusion et accessibilité. Ces contraintes sont issues de problématiques industrielles et illustrent par exemple, que des couples d'opérations doivent être affectées à la même station ou ne peuvent pas être affectées à la même station ou qu'une opération ne peut pas être réalisée sur certaines stations.

Le Transfert Line Balancing Problem (TLBP) tel qu'étudié dans la thèse de Youssef Lahrichi consiste à déterminer un équilibrage et un séquençement des opérations de manière à minimiser le nombre de machines utilisées. Trois types d'approches ont été proposés pour ce problème :

- Approche intégrée où la répartition des opérations sur les stations et le séquençement des opérations sont résolus en même temps. Pour ce type d'approche, nous avons proposé des modélisations mathématiques sous la forme de programmes linéaires en nombres entiers.
- Approche de type BF-SL (Balance First - Sequence Last) qui consiste à d'abord répartir les opérations sur les stations puis à procéder au séquençement des opérations dans chaque station. Pour cette approche, nous avons proposé une **hybridation (Programmation Linéaire \Leftrightarrow Programmation dynamique)** à garantie de performance et une **hybridation (Métaheuristique \Leftrightarrow Programmation dynamique)**.

Une solution est représentée par l'affectation des opérations aux stations. Trois mouvements ont été définis : le déplacement d'une opération d'une station à une autre, la fusion de 2 stations et la division d'une station en 2 stations. Le problème de séquençement est résolu en utilisant la programmation dynamique par analogie avec un problème de voyageur de commerce asymétrique.

- Approche de type SF-BL (Sequence First - Balance Last) qui consiste à construire une séquence géante d'opérations puis à procéder à la répartition de opérations entre les stations.

Cette répartition est réalisée de manière optimale grâce à la résolution d'un problème de plus court chemin dans un graphe auxiliaire. Ainsi, dans cette **hybridation (Métaheuristique \rightleftharpoons Programmation dynamique)**, une solution est représentée par une permutation d'opérations (σ) respectant les contraintes de précédence. Le mouvement de type insertion proposé pour le SALBP-1 est utilisé.

L'approche SF-BL a été étendue à deux autres problèmes d'équilibrage :

- le Robotic Assembly Line Balancing Problem (**RALBP**) : les hypothèses sont identiques à celles du SALBP mais les durées des opérations dépendent du type de robot affecté à la station. Un robot peut réaliser toutes opérations mais avec une performance dépendant de son type. En complément de la recherche d'un équilibrage, il s'agit de définir également le type de robot qui sera affecté à chaque station utilisée qui minimise le nombre de robots (**RALBP-1**) ou le temps de cycle (**RALBP-2**).
- le Sequence-Dependent Robotic Assembly Line Balancing Problem (**SDRALBP**) : aux hypothèses du RALBP s'ajoutent des temps de montage dépendant de la séquence. Il s'agit de rechercher une affectation des opérations aux stations, un séquençement de ces opérations à chaque station et une affectation d'un type de robot par station qui minimise le nombre de robots (**SDRALBP-1**) ou le temps de cycle (**SDRALBP-2**).

Le lecteur intéressé pourra se référer au chapitre 4 pour plus de détails sur les hybridations (Métaheuristique \rightleftharpoons Programmation dynamique) pour le TLBP.

Rééquilibrage de lignes d'assemblage

Dans le cadre d'une **collaboration avec la société PSA**, nous nous sommes intéressés au rééquilibrage de lignes d'assemblage d'un point de vue industriel. Chaque mois m , le séquençement global fournit une liste de véhicules à produire le mois $m + 1$ suivant ainsi que les quantités. L'affectation des opérations aux postes de travail étant calculée pour le volume de véhicules à produire pendant le mois m , cette affectation peut ne plus respecter certaines contraintes avec les volumes du mois $m + 1$. Par exemple, l'augmentation de la quantité à produire peut entraîner le dépassement du temps de cycle. L'ajout d'un type de véhicule qui n'était pas produit le mois m peut entraîner l'apparition de nouvelles opérations. Il s'agit donc d'adapter l'équilibrage du mois m au volume de véhicules à produire au mois $m + 1$ de manière à respecter l'ensemble des contraintes grâce au déplacement d'opérations tout en minimisant le nombre d'opérations déplacées.

Dans ce cadre, nous nous sommes intéressés à deux problématiques :

- l'adaptation d'un équilibrage réalisé pour un mois m au volume de véhicules à produire pour le mois $m + 1$. Pour cela, des heuristiques et des chaînages d'heuristiques ont été proposés et intégrés dans un environnement logiciel.
- les placements sur le bord de ligne, des outils et mobiliers nécessaires à la réalisation des opérations pour le mois $m + 1$. Des heuristiques, inspirées par des heuristiques pour le bin packing, ont été proposées et ajoutées à l'environnement logiciel.

Ces travaux ont été réalisés pendant le **Master recherche et le post-doctorat de Patrice Leclaire**.

Le lecteur intéressé pourra se référer au chapitre 4 pour plus de détails sur les heuristiques pour le problème de rééquilibrage.

Synthèse des contributions et placement dans le temps

Le tableau 1.3 et la figure 1.7 présentent une synthèse des contributions et des publications majeures pour cette thématique.

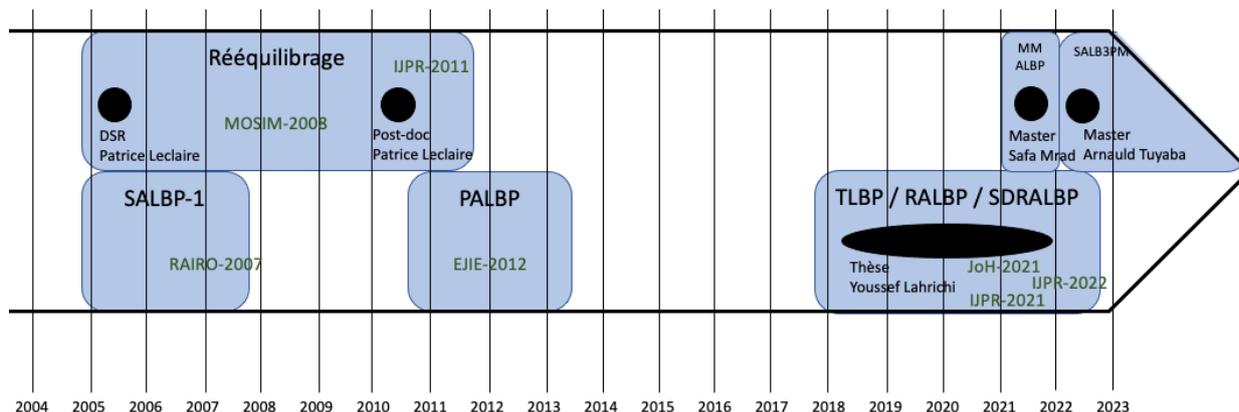


FIGURE 1.7 – Frise chronologique des travaux réalisés sur la thématique «équilibre et rééquilibre»

Problème	Revue ou conférence	Contenu - Référence
Simple Assembly Line Balancing Problem		
	Revue RAIRO	(Métaheuristique \Leftrightarrow Algorithme de liste) (GOURGAND, GRANGEON et NORRE 2007)
Parallel Assembly Line Balancing Problem		
	Revue EJIE	(Métaheuristique \Leftrightarrow Algorithme de liste) (GRANGEON et NORRE 2012)
Transfer Line Balancing Problem		
	Conférence MOSIM	Modèle mathématique (LAHRICHI, DEROUSSI et al. 2018)
	Revue JoH	Approche BF-SL - heuristique (Programmation Linéaire \Leftrightarrow Programmation dynamique) à garantie de performance et (Métaheuristique \Leftrightarrow programmation dynamique) (LAHRICHI, GRANGEON et al. 2021a)
	Revue IJPR	Approche SF-BL (Métaheuristique \Leftrightarrow Programmation dynamique) (LAHRICHI, GRANGEON et al. 2021b)
Robotic Assembly Line Balancing Problem		
	Revue IJPR	Approche SF-BL (Métaheuristique \Leftrightarrow Programmation dynamique) (LAHRICHI, DAMAND et al. 2023)
Rééquilibrage de lignes d'assemblage		
	Revue IJPR	Heuristiques et chaînages d'heuristiques (GRANGEON, LECLAIRE et al. 2011)
	Conférence MOSIM	Heuristiques pour le placement des contenants (GRANGEON N. et al. 2008)

TABLE 1.3 – Principales publications en lien avec les problèmes d'équilibre et de rééquilibre

1.4 Autres travaux

Dans cette partie, j'ai choisi de présenter deux autres thématiques, traitées de manière ponctuelle en lien avec une problématique réelle car les méthodes proposées complètent le panorama des hybridations proposées.

1.4.1 Planification de chaîne logistique

Dans le cadre d'une **collaboration avec la société PSA**, nous nous sommes intéressés à la chaîne d'approvisionnement automobile PSA et plus particulièrement à sa planification stratégique.

La chaîne d'approvisionnement peut être modélisée comme un réseau logistique composé de zones d'approvisionnement, de zones de production (les usines terminales) et de zones de vente. Les routes disponibles sont définies entre les zones d'approvisionnement et les zones de production (en tant que routes d'approvisionnement) ou entre les zones de production et les zones de vente (en tant que routes de distribution). Le réseau considéré intègre de nombreux paramètres tels que les capacités de production et d'approvisionnement, les coûts de transport et d'achat des composants, les coûts de douane.

Plusieurs types de véhicules sont considérés. Pour produire un type de véhicule, l'utilisation de plusieurs technologies de production disponibles auprès des zones de production est nécessaire. Une zone de production ne dispose pas de toutes les technologies de production, ce qui fait qu'un type de véhicule ne peut pas être produit par toutes les zones de production. Certaines technologies de production peuvent être partagées par plusieurs types de véhicules et certaines peuvent être dédiées à un seul type de véhicule.

La planification stratégique selon PSA doit définir les investissements en termes de capacités de production et de capacités d'approvisionnement de manière à minimiser le coût total d'exploitation de la chaîne d'approvisionnement. Dans le cadre du co-encadrement de la **thèse de Médéric Suon**, nous avons décomposé le problème de planification stratégique PSA en trois problèmes de complexité croissante :

- le problème de répartition stratégique sans contrainte de sourcing (2 niveaux / 1 période). Le problème consiste à déterminer les quantités de véhicules à produire par chaque zone de production et la manière de les distribuer vers les zones de commercialisation.
- le problème de répartition stratégique avec contrainte de sourcing (3 niveaux / 1 période). En complément du problème précédent, il faut également définir l'approvisionnement des zones de production.
- le problème de répartition stratégique avec investissements (3 niveaux / N périodes). Le problème s'intéresse aux décisions d'investissement en capacités et à la planification sur plusieurs périodes des activités d'approvisionnement, de production et de distribution

Chaque problème a été modélisé sous la forme d'un **programme non linéaire en nombres entiers**. La non-linéarité réside dans la fonction objectif qui intègre des coûts fixes et des coûts variables. Nous avons montré que cette fonction est non-convexe.

Pour le premier problème, une borne inférieure a été définie et trois approches ont été proposées :

- (**Métaheuristique**) : la représentation d'une solution est basée sur les quantités distribuées. Les quantités produites sont déduites par simple addition.
- (**Métaheuristique** \Leftrightarrow **Programmation linéaire**) : la représentation d'une solution est basée sur les quantités produites. Les quantités distribuées sont obtenues par la résolution d'un problème de transport à l'aide d'un programme linéaire en nombres entiers.

- **(Métaheuristique \Leftrightarrow Programmation linéaire successive)** : la représentation d'une solution est basée sur les quantités distribuées. Sur le même format qu'une recherche locale itérée, la programmation linéaire successive (SLP) est utilisée comme méthode de recherche locale au sein de la métaheuristique. Ces travaux ont été réalisés après la thèse de Médéric Suon et n'ont pas été publiés.

Pour chaque représentation, un mouvement consistant à déplacer une quantité de produit a été défini. Une version guidée a permis d'améliorer la vitesse de convergence.

Pour le second problème, sur le même principe, une borne inférieure a été définie et une **hybridation (Métaheuristique \Leftrightarrow (Programmation linéaire \rightarrow Programmation linéaire))** a été proposée. La représentation d'une solution est basée sur les quantités produites. Les quantités approvisionnées sont obtenues par la résolution d'un programme linéaire, puis, une fois les coûts de cession calculés, les quantités distribuées sont obtenues par la résolution du problème de transport (second programme linéaire).

Le tableau 1.4 liste les principales publications pour cette thématique.

1.4.2 Problème inverse des automates cellulaires

L'entreprise IBC (Integrative Bio-computing) développe une plateforme générique de simulation et de modélisation, qui génère des modèles multi-échelles des systèmes biologiques en particulier les organes humains. Cette plateforme combine des modèles à deux niveaux de description : macroscopique pour modéliser le fonctionnement de l'organe par des équations différentielles et microscopique pour modéliser les interactions au niveau cellulaire par automates cellulaires. Dans le cadre d'une **collaboration avec la société IBC** et du co-encadrement de la **thèse de Fazia Aïboud**, nous nous sommes intéressés au problème inverse des automates cellulaires.

Un automate cellulaire est défini par une grille, un ensemble d'états (de taille n), un système d'interaction et une fonction de transition. Dans le problème inverse des automates cellulaires, le problème consiste à déterminer, connaissant la configuration de départ de la grille (Sh^0), la fonction de transition (F) et le nombre de fois où cette fonction de transition doit être appliquée (nombre de générations Ng) pour obtenir une configuration cible (Sh^*). Ce problème est schématisé par la figure 1.8. L'idée est la modélisation de la croissance d'un organe.

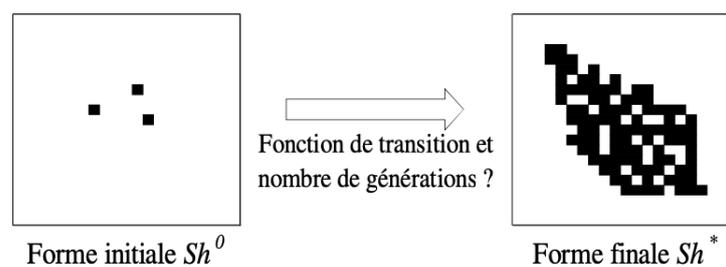


FIGURE 1.8 – Illustration du problème inverse des automates cellulaires

La fonction de transition donne, pour chaque combinaison de l'état d'une cellule et des cellules dans son système d'interaction, l'état de la cellule à la génération suivante. Nous avons représenté chaque combinaison d'états possible par un code. Un exemple est donné pour 2 états et le système d'interaction de Von Neumann par la figure 1.9 (le code est entre parenthèses). Déterminer la fonction de transition revient à déterminer, pour chaque combinaison d'état, la valeur de l'état à la génération suivante.

Le problème a été formalisé mathématiquement pour des grilles 1D, 2D et 3D, 2 états et les systèmes d'interaction de Von Neumann et de Moore de rayon 1.

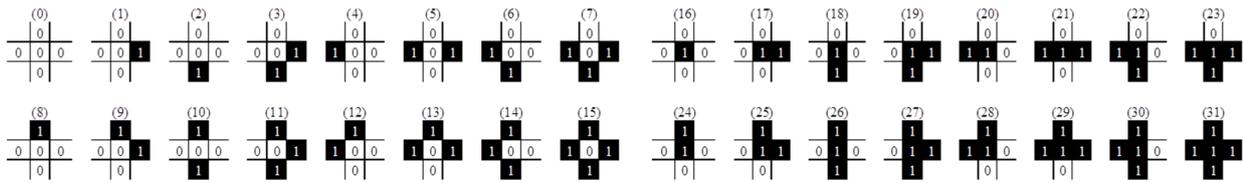


FIGURE 1.9 – Codification des combinaisons

Concernant les métaheuristiques, deux approches ont été proposées :

- approche (F, Ng) : une (**Métaheuristique**) qui considère simultanément la fonction de transition et le nombre de générations de l'automate cellulaire. Une solution est représentée par un vecteur composé de la fonction de transition et du nombre de générations (codé en base n où n est le nombre d'états)
- approche (Ng/F) : un **couplage (Métaheuristique \Leftrightarrow modèle de simulation)** qui considère uniquement la fonction de transition. Une solution est représentée uniquement par la fonction de transition et le nombre de générations optimal correspondant à cette fonction de transition est déterminé par le modèle de simulation de l'évolution de l'automate cellulaire.

La représentation d'une solution, codée en base n , étant bien adaptée aux métaheuristiques à population comme les algorithmes génétiques, nous avons commencé par définir un opérateur de croisement unipoint et un opérateur de mutation. Ensuite, nous nous sommes orientées vers les métaheuristiques à population en définissant trois mouvements : modification de 1, 2 ou $1..M$ éléments où M est la taille de la représentation de la solution.

Plusieurs critères de similarité ont été proposés pour comparer des grilles, certains issus du domaine de l'imagerie : nombre de cellules identiques, information mutuelle, écart quadratique, moments de legendre, ... L'information mutuelle et le nombre de cellules identiques ont été retenus.

Afin de réduire la taille de l'espace de recherche, nous avons proposé une représentation qui exploite les propriétés des formes telle que la symétrie.

Ces méthodes ont été appliquées sur des formes de la littérature et sur une bibliothèque de formes que nous avons générées en simulant l'évolution d'un automate cellulaire. Les résultats ont montré que les méthodes proposées permettent de retrouver les formes générées pour lesquelles une solution optimale existe. Par contre, nous avons montré que pour modéliser certains phénomènes biologiques tels que la croissance cellulaire, l'évolution des tumeurs ou la morphogénèse, il serait intéressant de générer des formes en plusieurs phases d'évolution. A chaque phase, la configuration initiale, la configuration finale, la fonction de transition et le nombre de générations de l'automate cellulaire changent.

Le tableau 1.4 liste les principales publications pour cette thématique.

Problème	Revue ou conférence	Contenu - Référence
Planification de la chaîne logistique		
	Conférence MOSIM	(Métaheuristique) et (Métaheuristique \rightleftharpoons Programmation linéaire) pour le problème de répartition stratégique sans contrainte de sourcing (GOURGUECHON et al. 2010b)
	Conférence ILS	(Métaheuristique \rightleftharpoons (Programmation linéaire \rightarrow Programmation linéaire)) pour le problème de répartition stratégique avec contrainte de sourcing (GOURGUECHON et al. 2010a)
Problème inverse des automates cellulaires		
	Conférence EA	(Métaheuristique) (AIBOUD, GRANGEON et al. 2011)
	Conférence EA	(Métaheuristique \rightleftharpoons Modèle de simulation) et exploitation de la symétrie (AIBOUD, GRANGEON et al. 2013)

TABLE 1.4 – Principales publications en lien avec les thématiques présentées

1.5 Conclusion

Nos principales contributions peuvent être résumées en deux grandes familles d'approche :

- (Métaheuristique \rightleftharpoons Modèle ou Méthode approchée) qui regroupe les couplages utilisant un modèle d'évaluation des performances et les hybridations utilisant des heuristiques. Les heuristiques utilisées sont des heuristiques gloutonnes dont le fonctionnement se révèle très proche d'un modèle de simulation (algorithme d'ordre strict SGS ou algorithme d'ordonancement de projet). Ces heuristiques construisent une solution approchée à partir d'une représentation indirecte.
- (Métaheuristique \rightleftharpoons Méthode exacte) qui regroupe les hybridations de type matheuristique, utilisant principalement la programmation dynamique. Toutefois, des travaux récents s'intéressent à des hybridations intégrant la programmation linéaire. La solution construite par la méthode exacte correspond à la résolution exacte d'un sous-problème d'optimisation.

Concernant la représentation des solutions, la notion de permutation est dominante ce qui n'est pas surprenant compte-tenu des problèmes étudiés. Généralement, la programmation dynamique est utilisée pour construire une affectation des ressources optimale pour une permutation donnée. Pour certains problèmes, il s'est avéré nécessaire de représenter également l'affectation aux ressources.

Afin de synthétiser les travaux présentés dans ce document, nous avons répertorié, par thème et par problème, les contributions apportées lors de mes travaux de recherche. Ces travaux ont fait l'objet de collaborations ou de contrats avec des entreprises (PSA, CHU de Clermont-Ferrand, IBC, Hôpital de Montluçon)

1.5.1 Ordonnancement d'activités dans un environnement multi-sites

Flow-Shop stochastique

- Proposition d'un modèle markovien pour le calcul de l'espérance mathématique du makespan dans un Flow-Shop à m machines avec stocks de capacité quelconque (nulle, limitée ou illimitée) et temps de traitement exponentiellement distribués
- Proposition d'un couplage (métaheuristique \Leftrightarrow modèle markovien) pour le problème d'ordonnancement du Flow-Shop avec des temps de traitement exponentiellement distribués et des stocks de capacité quelconque
- Proposition d'un couplage (métaheuristique \Leftrightarrow modèle de simulation) pour le problème d'ordonnancement du Flow-Shop avec des temps de traitement suivant une distribution quelconque et des stocks de capacité quelconque

Planification d'activités

Thèse de Nathalie Klément

- Proposition de 3 modélisations mathématiques de complexité croissante selon les hypothèses sur la capacité des ressources humaines (illimitée ou limitée) et leur affectation (connue ou inconnue)
- Analogie avec 3 problèmes de Bin-Packing (1D, 1D avec interdépendances et 1D avec incompatibilités)
- Proposition d'hybridations (métaheuristique \Leftrightarrow heuristique) pour les 3 problèmes.

RCPSP multi-sites

Thèse de Arnaud Laurent

- Proposition et formalisation du modèle d'une extension du RCPSP : le RCPSP multi-site,
- Proposition de 2 modélisations mathématiques (l'une avec des contraintes cumulatives, l'autre individualisant les ressources)
- Proposition de 3 hybridations (métaheuristique \Leftrightarrow SGS) utilisant 3 représentations de solution (une directe et deux indirectes)

Ordonnancement d'activités de livraison-collecte

Thèse de Virginie André
CHU de Clermont-Fd

- Identification et formalisation de 3 problèmes d'optimisation de complexité croissante
 - Proposition de 2 modélisations mathématiques pour le problème de transport d'un seul type de produit
 - Proposition de 2 couplages (métaheuristique \Leftrightarrow modèle de simulation) pour le problème de transport de plusieurs types de produits, l'un utilisant une représentation directe d'une solution et l'autre utilisant une représentation indirecte.
 - Proposition d'une hybridation (modèle de simulation \rightarrow (PLNE \Leftrightarrow (métaheuristique \Leftrightarrow Modèle de simulation))) pour le problème de dimensionnement et de constitution des plannings des chauffeurs
-

1.5.2 Extensions du problème de voyageur de commerce multiple

m-TSPTW avec contraintes de synchronisation

Thèse de Fabrice Gayraud
Hôpital de Montluçon
(HAD et SSIAD)

- Identification et proposition d'une extension du m-TSP
- Proposition de 2 modélisations mathématiques
- Proposition d'un couplage (métaheuristique \Leftrightarrow modèle de simulation) utilisant une représentation indirecte
- Proposition d'une hybridation (métaheuristique \Leftrightarrow algorithme d'ordonnancement de projet) utilisant une représentation directe

Parallel Drone Scheduling Traveling Salesman Problem

Thèse de Raïssa Saleu

- Proposition d'une modélisation mathématique et extension au Parallel Drone Scheduling Multiple Traveling Salesman Problem
- Proposition d'une hybridation (Métaheuristique \Leftrightarrow Programmation dynamique) et extension au Parallel Drone Scheduling Multiple Traveling Salesman Problem

1.5.3 Equilibrage et rééquilibrage de lignes d'assemblage

Assembly Line Balancing Problem

- Proposition d'une hybridation (métaheuristique \Leftrightarrow heuristique) exploitant l'analogie entre le SALBP et le problème du Bin-Packing 1D
- Extension de l'hybridation (métaheuristique \Leftrightarrow heuristique) proposée pour le SALBP au Parallel Assembly Line Balancing Problem
- Proposition d'une hybridation (métaheuristique \Leftrightarrow programmation linéaire) pour le Simple Assembly Line Balancing Problem With Power Peak Minimization

Transfer Line Balancing Problem

Thèse de Youssef Lahrichi

- Proposition d'une modélisation mathématique
- Proposition selon une approche de type BF-SL (Balance First - Sequence Last) d'une hybridation (Programmation Linéaire \Leftrightarrow Programmation dynamique) à garantie de performance et une hybridation (Métaheuristique \Leftrightarrow Programmation dynamique).
- Proposition selon une approche de type SF-BL (Sequence First - Balance Last) d'une hybridation (Métaheuristique \Leftrightarrow Programmation dynamique)

Robotic Assembly Line Balancing Problem	Thèse de Youssef Lahrichi
<ul style="list-style-type: none"> — Extension de l'hybridation (Métaheuristique \Leftrightarrow Programmation dynamique) selon l'approche SF-BL au Robotic Assembly Line Balancing Problem — Extension de l'hybridation (Métaheuristique \Leftrightarrow Programmation dynamique) selon l'approche SF-BL au Sequence-Dependent Robotic Assembly Line Balancing Problem 	
Rééquilibrage de lignes d'assemblage	Master et Post-doctorat de Patrice Leclaire Contrat PSA
<ul style="list-style-type: none"> — Proposition d'heuristiques et de chaînage d'heuristiques pour adapter l'équilibrage d'un mois m au mois $m + 1$ — Formulation du problème de placement des mobiliers en bord de ligne et proposition d'heuristiques 	
1.5.4 Autres travaux	
Planification de la chaîne logistique	Thèse de Médéric Suon Contrat CIFRE PSA
<ul style="list-style-type: none"> — Identification de 3 problèmes de complexité croissante : répartition stratégique sans contrainte de sourcing, répartition stratégique avec contrainte de sourcing, répartition stratégique avec investissements — Proposition d'une modélisation mathématique pour chaque problème — Proposition d'une métaheuristique, d'une hybridation (métaheuristique \Leftrightarrow programmation linéaire) et d'une hybridation (métaheuristique \Leftrightarrow programmation linéaire successive) pour le problème de répartition stratégique sans contrainte de sourcing — Proposition d'une hybridation (métaheuristique \Leftrightarrow (programmation linéaire \rightarrow programmation linéaire)) pour le problème de répartition stratégique avec contrainte de sourcing 	
Problème inverse des automates cellulaires	Thèse de Fazia Aïboud Collaboration avec IBC
<ul style="list-style-type: none"> — Modélisation du problème sous la forme d'un problème d'optimisation combinatoire — Proposition d'une métaheuristique et d'un couplage (métaheuristique \rightarrow modèle de simulation) — Proposition de plusieurs critères de similarité pour évaluer les solutions construites — Proposition d'extension exploitant les propriétés des formes 	

Références

- CUNNINGHAM, A. A. et S. K. DUTTA (1973). « Scheduling jobs, with exponentially distributed processing times, on two machines of a flow shop ». In : *Naval Research Logistics Quarterly* 20.1, p. 69-81.
- GLOVER, F. (1977). « Future paths for integer programming and links to artificial intelligences ». In : *Decision Sciences* 8, p. 156-166.
- KIRKPATRICK, S., C. GELATT et M. VECCHI (1982). « Optimization by simulated annealing ». In : *IBM Research report RC 9355*.
- BEASLEY, J. (1983). « Route first—Cluster second methods for vehicle routing ». In : *Omega* 11.4, p. 403-408.
- FLEURY, G. (1993). « Méthodes stochastiques et déterministes pour les problèmes NP-difficiles ». Thèse de doct. Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand II.
- D. WOLPERT, W. M. (1997). « No free lunch theorems for optimization ». In : *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 1.1, p. 67-82.
- DORIGO, M. et L. GAMBARDILLA (1997). « Ant colony system : a cooperative learning approach to the traveling salesman problem ». In : *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 1.1, p. 53-66.
- TALBI, E.-G. (2002). « A Taxonomy of Hybrid Metaheuristics ». In : *Journal of Heuristics* 8.5, p. 541-564.
- LOURENÇO, H. R., O. C. MARTIN et T. STÜTZLE (2003). « Iterated Local Search ». In : *Handbook of Metaheuristics*. Sous la dir. de F. GLOVER et G. A. KOCHENBERGER. Boston, MA : Springer US, p. 320-353.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2004). « A contribution to the stochastic Flow Shop scheduling problem ». In : *EJOR (European Journal of Operational research)* 151.2, p. 415-433.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2005). « Markovian analysis for performance evaluation and scheduling in M machine stochastic flow-shop with buffers of any capacity ». In : *EJOR (European Journal of Operational research)* 161.1, p. 126-147.
- NORRE, S. (2005). « Heuristiques et métaheuristiques pour la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire dans les systèmes de production ». HdR, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
- PUCHINGER, J. et G. R. RAIDL (2005). « Combining Metaheuristics and Exact Algorithms in Combinatorial Optimization : A Survey and Classification ». In : *Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Applications : A Bioinspired Approach*. Sous la dir. de J. MIRA et J. R. ÁLVAREZ. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 41-53.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2007). « Metaheuristics based on Bin Packing for the line balancing problem ». In : *RAIRO Operational research* 41.2, p. 193-211.
- GRANGEON N., P. LECLAIRE et S. NORRE (2008). « Placement de contenants dans une ligne d'assemblage ». In : *MOSIM'08 (7ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation), Paris, avril 2008*.
- GOURGUECHON, O., N. GRANGEON, S. NORRE et M. SUON (2010a). « A hybrid metaheuristic for a strategic supply chain planning problem with procurement-production-distribution activities and economy of scale ». In : *ILS'2010 (Third International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain), 14 au 16 avril 2010, Casablanca, Maroc*.
- GOURGUECHON, O., N. GRANGEON, S. NORRE et M. SUON (2010b). « Un problème de planification stratégique de type production – distribution avec économies d'échelle et technologies de production ». In : *MOSIM 2010 (8ème Conférence Internationale de Modélisation et Simulation), Hammamet, Tunisie, 10-12 mai 2010*.
- AIBOUD, F., N. GRANGEON et S. NORRE (2011). « Simulated annealing based metaheuristics and binary cellular automata to generate 2D shapes ». In : *EA2011. 10th International Conference on Artificial Evolution. Angers*.

- ANDRÉ, V., N. GRANGEON, S. NORRE et F. PHILIPPE (2011a). « A combination metaheuristic-simulation for solving a transportation problem in a hospital environment ». In : *IESM'11*, 25 au 27 mai 2011, Metz, France.
- ANDRÉ, V., N. GRANGEON, S. NORRE et F. PHILIPPE (2011b). « Dimensionnement et constitution des plannings journaliers pour un problème de transport hospitalier ». In : *JDJN-Macs 2011*, Marseille (France), 9-10 juin 2011.
- BLUM, C., J. PUCHINGER, G. R. RAIDL et A. ROLI (2011). « Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization : A survey ». In : *Applied Soft Computing* 11.6, p. 4135-4151.
- GRANGEON, N., P. LECLAIRE et S. NORRE (2011). « Heuristics for the re-balancing of a vehicle assembly line ». In : *IJPR (International Journal of Production Research)* 49.22, p. 6609-6628.
- ANDRÉ, V., N. GRANGEON, S. NORRE et F. PHILIPPE (2012). « RCPSP et temps de montage dépendant de la séquence pour la modélisation et la résolution d'un problème de livraison collective ». In : *MOSIM 2012*, 06-08 Juin 2012, Bordeaux.
- GRANGEON, N. et S. NORRE (2012). « Extending metaheuristics based on bin packing for SALBP to PALBP ». In : *EJIE (European Journal of Industrial Engineering)* 6, p. 713-732.
- AIBOUD, F., N. GRANGEON et S. NORRE (2013). « Improving efficiency of metaheuristics for cellular automaton inverse problem ». In : *EA2013. 11th International Conference on Artificial Evolution*. Bordeaux.
- AIBOUD, F. (2013). « Méthodes approchées pour la résolution de problèmes inverses : identification paramétrique et génération de formes ». Thèse de doct. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
- ANDRÉ, V., N. GRANGEON et S. NORRE (2013). « Combination of a Metaheuristic and a Simulation Model for the Scheduling of Resource-constrained Transport Activities ». In : *Metaheuristics for Production Scheduling*. John Wiley & Sons. Chap. 15.
- GAYRAUD, F., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2013). « A New Mathematical Formulation For The Home Health Care Problem ». In : *HCist 2013, Conference on Health and Social Care Information Systems and Technologies*, Lisbon, Portugal. Octobre 2013.
- SÖRENSEN, K. et F. GLOVER (2013). « Metaheuristics ». In : *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*. Sous la dir. de S. I. GLASS et M. C. FU. Springer, Boston, MA, p. 960-970.
- SUR, C., S. SHARMA et A. SHUKLA (2013). « Egyptian Vulture Optimization Algorithm – A New Nature Inspired Meta-heuristics for Knapsack Problem ». In : *The 9th International Conference on Computing and Information Technology (IC2IT2013)*. Sous la dir. de P. MEESAD, H. UNGER et S. BOONKONG. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 227-237.
- TALBI, E.-G. (2013). « A Unified Taxonomy of Hybrid Metaheuristics with Mathematical Programming, Constraint Programming and Machine Learning ». In : *Hybrid Metaheuristics*. Sous la dir. d'E.-G. TALBI. Springer Berlin Heidelberg, p. 3-76.
- GAYRAUD, F., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2014). « Problème de tournées de véhicules avec synchronisation pour l'organisation de soins à domicile ». In : *MOSIM 2014 (Modélisation et Simulation)*. Nancy. 5-7 novembre 2014.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et N. KLEMENT (2014). « An analogy between bin packing problem and permutation problem : a new encoding scheme ». In : *7th International Conference, APMS 2014*, Ajaccio, France, 20-24 septembre 2014.
- KLEMENT, N. (2014). « Planification et affectation de ressources dans les réseaux de soin : Analogie avec le problème du bin packing. Proposition de méthodes approchées ». Thèse de doct. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et N. KLEMENT (2015). « Activities planning and resources assignment on distinct places : a mathematical model ». In : *RAIRO Operational research* 49, p. 79-98.
- LAURENT, A., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2017a). « A new extension of the RCPSP in a Multi-Site context : Mathematical Model and Metaheuristics ». In : *Computers & Industrial Engineering* 112, p. 634-644.

- LAURENT, A., L. DEROUSSI, N. **GRANGEON** et S. NORRE (2017b). « Comparison of Three Solution Encodings and Schedule Generation Scheme for the Multi-Site RCPSP ». In : *IFAC 2017 (International Federation of Automatic Control World Congress)*, Toulouse (France), juillet 2017.
- LAHRICHI, Y., L. DEROUSSI, N. **GRANGEON** et S. NORRE (2018). « Reconfigurable transfer line balancing problem : A new MIP approach and approximation hybrid algorithm ». In : *MOSIM 2018 (Modélisation et Simulation)*. Toulouse, 27-29 juin 2018.
- MBIADOU SALEU, R., L. DEROUSSI, D. FEILLET, N. **GRANGEON** et A. QUILLIOT (2018). « An iterative two-step heuristic for the Parallel Drone Scheduling Traveling Salesman Problem ». In : *Networks* 72.4, p. 459-474.
- SÖRENSEN, K., M. SEVAUX et F. GLOVER (2018). « A History of Metaheuristics ». In : *Handbook of Heuristics*. Sous la dir. de R. MARTÍ, P. M. PARDALOS et M. G. C. RESENDE. Cham : Springer International Publishing, p. 791-808.
- GIANESSI, P., X. DELORME et O. MASMOUDI (2019). « Simple Assembly Line Balancing Problem with Power Peak Minimization ». In : *Advances in Production Management Systems. Production Management for the Factory of the Future. APMS 2019. IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Sous la dir. de F. AMERI, K. STECKE, G. von CIEMINSKI et D. K. (EDS). T. 566. Springer, Cham.
- MARTÍNEZ-ÁLVAREZ, F., G. ASECIO-CORTÉS, J. F. TORRES, D. GUTIÉRREZ-AVILÉS, L. MELGARGARCÍA, R. PÉREZ-CHACÓN, C. RUBIO-ESCUADERO, J. C. RIQUELME et A. TRONCOSO (2020). « Coronavirus Optimization Algorithm : A Bioinspired Metaheuristic Based on the COVID-19 Propagation Model ». In : *Big Data* 8.4, p. 308-322.
- DRĂGOI, E. N. et V. DAFINESCU (2021). « Review of Metaheuristics Inspired from the Animal Kingdom ». In : *Mathematics* 9.2335.
- LAHRICHI, Y., N. **GRANGEON**, L. DEROUSSI et S. NORRE (2021a). « A Balance-First Sequence-Last Algorithm to design RMS - A Matheuristic with performance guaranty to balance Reconfigurable Manufacturing Systems ». In : *Journal of Heuristics Special issue on Matheuristics* 27, p. 107-132.
- LAHRICHI, Y., N. **GRANGEON**, L. DEROUSSI et S. NORRE (2021b). « A new split-based hybrid metaheuristic for the reconfigurable transfer line balancing problem ». In : *IJPR (International Journal of Production Research)* 59.4, p. 1127-1144.
- MANIEZZO, V., M. A. BOSCHETTI et T. STÜTZLE (2021). *Matheuristics - Algorithms and Implementations*. Springer Cham.
- BOSCHETTI, M. A. et V. MANIEZZO (2022). « Matheuristics : using mathematics for heuristic design ». In : *4OR* 20.2, p. 173-208. URL : <https://doi.org/10.1007/s10288-022-00510-8>.
- MBIADOU SALEU, R., L. DEROUSSI, D. FEILLET, N. **GRANGEON** et A. QUILLIOT (2022). « The Parallel Drone Scheduling Problem with Multiple Drones and Vehicles ». In : *European Journal of Operational Research* 300.2, p. 571-589.
- STEGHERR, H., M. HEIDER et J. HÄHNER (2022). « Classifying Metaheuristics : Towards a unified multi-level classification system ». In : *Natural Computing* 21.2, p. 155-171.
- LAHRICHI, Y., D. DAMAND, L. DEROUSSI, N. **GRANGEON** et S. NORRE (2023). « Investigating two variants of the sequence-dependent robotic assembly line balancing problem by means of a split-based approach ». In : *International Journal of Production Research* 61.7, p. 2322-2338.

Chapitre 2

Ordonnancement d'activités dans un environnement multi-sites

Sommaire

2.1	Introduction	65
2.2	RCPSP et extensions	67
2.2.1	Application industrielle	67
2.2.2	Profil de demande en ressources variable	68
2.2.3	Individualisation des ressources	69
2.3	Ordonnancement d'activités dans une communauté hospitalière	69
2.3.1	Présentation du RCPSP multi-sites	70
2.3.2	Hybridations (métaheuristique \Leftrightarrow algorithme d'ordre strict)	71
2.3.3	Résultats	75
2.4	Ordonnancement d'activités de livraison-collecte dans un réseau de soins	77
2.4.1	Le problème d'ordonnancement d'activités de livraison-collecte	78
2.4.2	Couplage (métaheuristique \Leftrightarrow modèle de simulation)	81
2.4.3	Résultats	82
2.5	Conclusion	83
	Références	83

2.1 Introduction

De nombreuses définitions de l'ordonnancement existent et elles utilisent toutes les notions de tâches, de localisation temporelle des tâches et de ressources pour réaliser ces tâches. Par exemple, selon (CARLIER et CHRÉTIENNE 1982) « *Ordonnancer c'est programmer l'exécution d'une réalisation en attribuant des ressources aux tâches et en fixant leurs dates d'exécution.* ». Résoudre un problème d'ordonnancement revient donc à répondre aux questions «quand» et «avec quels moyens» exécuter chacune des tâches.

Les problèmes d'ordonnancement remontent à l'après guerre et « *apparaissent dans tous les domaines de l'économie : l'informatique (tâches : jobs ; ressources : processeurs ou mémoire...), la construction (suivi de projet), l'industrie (problèmes d'ateliers, gestion de production), l'administration (emplois du temps).* » (CARLIER et CHRÉTIENNE 1982)

Jusqu'en 1955, la représentation sous la forme d'un « diagramme de Gantt » était suffisante pour gérer un projet. Mais la complexité de sa construction augmentant avec le nombre de tâches et d'informations à gérer amena les chercheurs en recherche opérationnelle à utiliser la théorie des graphes pour résoudre un problème d'ordonnancement de projet. Trois méthodes furent ainsi mises au point quasi simultanément (vers 1958) :

- CPM (Critical Path Method) développée par l'entreprise américaine de produits chimiques E.I. duPont de Nemours, pour transformer et optimiser ses centres de production,
- PERT (Project Evaluation and Research Task) développée par les Forces navales des États-Unis pour le programme de missiles balistiques Polaris,
- MPM (Méthodes des Potentiels Metra) développée par Bernard Roy pour la construction du paquebot France.

Ces méthodes considèrent uniquement des tâches reliées par des contraintes de précédence. Dans certains cas, les contraintes de ressources peuvent être traduites par une contrainte de précédence entre deux tâches pour exprimer qu'elles partagent la même ressource.

Parallèlement à l'ordonnement de projet, l'ordonnement d'atelier a vu le jour. Un ensemble de jobs (pièces) doit être réalisé (usiné ou assemblé) sur différentes machines. Selon les contraintes de précédence entre les tâches nécessaires à la réalisation des jobs, on distingue :

- le modèle du Flow-Shop dans lequel l'ordre de passage des tâches sur les machines est identique pour toutes les tâches,
- le modèle du Job-Shop dans lequel l'ordre de passage des tâches sur les machines diffère selon les tâches,
- le modèle de l'Open-Shop dans lequel l'ordre de passage des tâches sur les machines n'est pas imposé.

Ces modèles sont des modèles théoriques qui sont rapidement limités pour la modélisation de problèmes réels incluant des ressources multiples ou des cheminements des tâches plus complexes.

Après avoir débuté par une thèse sur les problèmes d'ordonnement et d'affectation dans un Flow-Shop Hybride en contexte déterministe et en contexte stochastique, mes travaux de recherche se sont tournés vers le problème d'ordonnement de projet avec contraintes de ressources (Resource Constrained Project Scheduling Problem - RCPSP) qui constitue une généralisation des problèmes d'atelier et d'ordonnement.

Le RCPSP a été introduit par (PRITSKER et al. 1969). Mais ce n'est que ces 20 ou 30 dernières années que la complexité du problème d'ordonnement et son grand potentiel en terme de modélisation ont soulevé l'intérêt des communautés scientifiques comme le montrent :

- les nombreux états de l'art sur le sujet : HERROELEN, DEREYCK et al. 1998, BRUCKER et al. 1999, SCHWINDT et ZIMMERMANN 2015, BENISSA et TU 2020, ...
- les nombreuses méthodes d'optimisation proposées et en particulier les métaheuristiques hybrides : PELLERIN et al. 2020.
- les nombreuses applications et extensions étudiées : HERROELEN et LEUS 2005, ARTIGUES et al. 2008, HARTMANN et BRISKORN 2010, BASSET et al. 2020, ...

Le RCPSP en tant que généralisation du problème du Job-Shop est un problème NP-difficile au sens fort (BLAZEWICZ et al. 1983).

Nous nous intéressons plus particulièrement aux problèmes d'ordonnement dans un réseau logistique composé de plusieurs sites géographiques. Il s'agit alors de répondre aux questions « quand », « avec quels moyens » et « où » exécuter chacune des tâches, ce qui nous permet de compléter la définition d'une tâche de (GOTHA 1993) : « Une tâche est un travail élémentaire nécessitant un certain nombre d'unités de temps et de ressources » par « ainsi qu'un lieu d'exécution ».

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à deux problèmes d'ordonnement dans un réseau logistique :

- Le premier problème est nommé « RCPSP multi-sites ». Ce problème théorique nous a été inspiré par un problème d’ordonnancement d’activités de soin dans une Communauté Hospitalière de Territoires. Trois approches utilisant des métaheuristiques hybridées avec des algorithmes d’ordre strict sont proposées. La complexité de l’algorithme d’ordre strict dépend de la complexité de la représentation d’une solution. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Arnaud Laurent ([LAURENT 2017](#)).
- Le second problème s’intéresse à l’ordonnancement des activités de livraison-collecte de produits hôteliers et de médicaments dans le cadre d’une réorganisation du Centre Hospitalier Universitaire de Clermont-Ferrand. Un important travail de modélisation du système logistique a été réalisé avant la proposition d’un couplage (métaheuristique \rightleftharpoons modèle de simulation). Ces travaux ont été réalisés pendant la thèse de Virginie André ([ANDRÉ 2011](#)).

La présentation et la résolution de ces problèmes sont précédées d’une définition du RCPSP et de deux extensions qui ont été proposées pour répondre à une problématique proposée par la société PSA Peugeot Citroën.

2.2 RCPSP et extensions

Soient :

- N , le nombre de tâches à ordonnancer ; les tâches 1 et N représentent les tâches fictives de début et de fin de projet,
- \mathcal{P} , un ensemble de contraintes de précédence, \mathcal{P}_i est l’ensemble des tâches qui doivent précéder la tâche i ,
- d_i , la durée de la tâche i , $i = 2, N - 1$; ($d_1 = d_N = 0$),
- K , le nombre de types de ressources renouvelables,
- R_k , le nombre de ressources de type k , $k = 1, K$ disponibles,
- $r_{i,k}$, le nombre de ressources de type k , $k = 1, K$ nécessaires pour réaliser la tâche i .

Un problème d’ordonnancement de projet avec contraintes de ressources (RCPSP) consiste à déterminer la date de début de chaque tâche tout en respectant :

C1 - contraintes de précédence : la tâche i ne peut pas débuter sa réalisation tant que toutes les tâches $j \in \mathcal{P}_i$ ne sont pas terminées,

C2 - contraintes de disponibilité des ressources : à chaque instant t , le nombre de ressources utilisées par les tâches en cours de réalisation à l’instant t doit être inférieur au nombre de ressources disponibles.

Généralement, le critère de performance étudié est la date de fin du projet (makespan), c’est-à-dire la date de fin de la tâche N .

Dans un contexte industriel, les hypothèses concernant les ressources peuvent paraître très restrictives et nos travaux nous ont amenés à proposer deux extensions ([GOURGAND et al. 2008](#)) permettant de modéliser plus finement l’utilisation des ressources. Une telle problématique industrielle a été rencontrée au travers du problème industriel des chantiers polyvalents de la société PSA Peugeot Citroën ([BOUTEVIN 2003](#)) que nous décrivons rapidement.

2.2.1 Application industrielle

Un chantier polyvalent est dédié à l’assemblage de pièces de rechange usinées en lots nommés « convois ». Il est divisé en surfaces élémentaires (2 en longitudinal, m en transversal). Des ressources humaines (monteurs et opérateurs) et des ressources matérielles (pinces à souder, rails,

surfaces) sont disponibles en nombre limité sur chaque chantier. Un convoi peut être placé sur le chantier selon au maximum deux dispositions. Le nombre de surfaces élémentaires contiguës requises longitudinalement et transversalement et le nombre de ressources matérielles nécessaires diffèrent selon la disposition choisie.

L'usinage d'un convoi est divisé en trois étapes (figure 2.1) : l'installation, la fabrication et la désinstallation. Un convoi est caractérisé par le nombre de ressources humaines nécessaires, la durée des étapes d'installation, de fabrication et de désinstallation, le nombre de dispositions possibles (au maximum 2) et pour chaque disposition, le nombre de surfaces élémentaires nécessaires longitudinalement et transversalement, le nombre de ressources matérielles nécessaires et la durée de l'étape de fabrication. Deux types de ressources humaines sont disponibles : les monteurs n'interviennent que lors des phases d'installation et de désinstallation alors que les opérateurs n'interviennent que lors de la phase de fabrication.

Les durées de chaque étape sont connues mais il est nécessaire d'ajouter à ces étapes les périodes d'attente des opérateurs et des monteurs dont la durée est inconnue. Il est également nécessaire de libérer les monteurs après la phase d'installation et les opérateurs après le phase de fabrication.

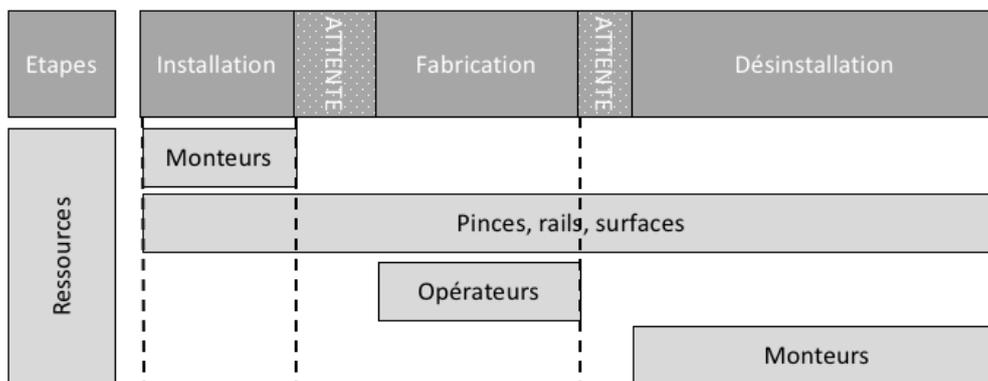


FIGURE 2.1 – Trois étapes d'usinage d'un « convoi »

2.2.2 Profil de demande en ressources variable

Dans les modèles classiques du RCPS, le nombre de ressources allouées à une tâche est constant tout au long de son traitement. Cette hypothèse est très restrictive car la réalisation d'une tâche est fréquemment découpée en plusieurs étapes dont les besoins en ressources sont distincts.

Dans un RCPS avec profil de demande en ressources variable, une tâche est composée d'étapes qui se réalisent successivement. Deux étapes successives ont des besoins en ressources différents pour au moins un type de ressource. La variation du nombre de ressources peut entraîner une période d'attente entre deux étapes due à l'indisponibilité de certaines ressources pour débiter la seconde étape. Si deux étapes successives nécessitent des ressources communes, ces ressources ne sont pas libérées durant la période d'attente qui peut séparer ces deux étapes.

La contrainte sur la disponibilité des ressources devient :

C2' - contraintes de disponibilité des ressources : à chaque instant t , le nombre de ressources utilisées par les tâches en cours de réalisation à l'instant t doit être inférieur au nombre de ressources disponibles moins les ressources non libérées en attente à l'instant t .

Exemple 1. La figure 2.2 présente un rapide exemple avec 2 tâches (B et C) composées chacune de 3 étapes. La ressource utilisée par l'étape C2 est conservée pendant la période d'attente nécessaire pour débiter l'étape C3, elle ne peut pas être utilisée pour une autre tâche.

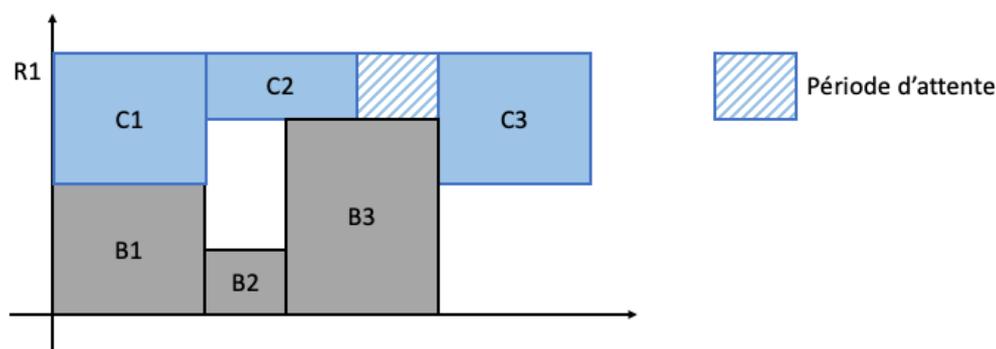


FIGURE 2.2 – Profil de demande en ressources variable - Illustration

2.2.3 Individualisation des ressources

Cette extension est un choix de modélisation et de résolution qui permet non seulement de déterminer la date de début de chaque tâche mais également d'allouer explicitement les ressources aux tâches. Cela peut être nécessaire pour modéliser (NORRE 2005) des :

incompatibilités entre ressources : parmi l'ensemble des ressources disponibles, certaines ressources ne peuvent pas être utilisées pour réaliser la même tâche. Cette contrainte permet de modéliser des compétences : la ressource humaine $R1a$ ne sait pas utiliser le matériel $R2a$ ou le fait que deux ressources humaines ne s'entendent pas.

incompatibilités entre tâches et ressources : pour un type de ressource donné, une tâche ne peut être réalisée que par un sous ensemble de ressources de ce type. Cette contrainte permet également de modéliser des compétences liées cette fois à la tâche à réaliser ou des affinités entre une tâche et une ressource.

ou des **contraintes géographiques** comme nous le verrons dans les sections suivantes (un peu de suspense...).

Cette extension complète la contrainte de disponibilité des ressources et demande une modélisation plus fine de la consommation des ressources en intégrant un sous-problème d'affectation des ressources aux tâches .

2.3 Ordonnancement d'activités dans une communauté hospitalière

Ces dernières années, le gouvernement français a exploré plusieurs pistes pour améliorer l'efficacité du système hospitalier. Plusieurs réformes de santé ont vu le jour, notamment le Plan Hôpital 2007 instauré en 2003, puis le Plan Hôpital 2012 instauré en 2007 et la loi Hôpital, Patients, Santé et Territoires (HPST) instaurée en 2009. Une des propositions de ces différentes réformes est la coopération entre les Centres Hospitaliers. Parmi les formes de coopération existantes, nous nous sommes intéressés à la Communauté Hospitalière de Territoire (CHT) qui est une structure composée d'établissements publics de santé. L'objectif de la CHT est la définition d'une stratégie commune et la mutualisation de moyens afin d'améliorer leur performance et d'accroître la qualité et la sécurité des soins dispensés.

Dans nos travaux, une CHT est composée de plusieurs sites géographiques. Dans chaque site, des équipements sont disponibles selon un planning d'ouverture connu. Les ressources humaines sont employées par un site mais peuvent travailler dans d'autres sites appartenant à la CHT moyennant un temps de déplacement entre les sites. Chaque ressource humaine dispose d'un planning qui définit son temps de travail journalier et de compétences qui lui permettent d'utiliser un équipement ou non. La réalisation d'une activité de soin demande une équipe médicale, composée

d'une ou plusieurs ressources humaines, et un ou plusieurs équipements. Une activité doit être réalisée avant une date au plus tard et a une durée connue qui dépend des équipements et de l'équipe médicale affectés. Le problème consiste à déterminer la date de réalisation de chaque activité de soin tout en lui affectant un site et les ressources matérielles et humaines nécessaires. Les activités doivent être réalisées le plus tôt possible.

Nous avons choisi de modéliser le problème par un Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP) dans lequel les tâches à ordonnancer sont les activités de soins à réaliser pour des patients. Plusieurs activités de soins peuvent être amenées à être réalisées pour un même patient selon un certain ordre. Le RCPSP ne permettant pas de prendre en compte la gestion des temps de transfert des patients et / ou des ressources entre les sites, nous avons proposé d'étendre le RCPSP classique au RCPSP multi-sites.

2.3.1 Présentation du RCPSP multi-sites

Pour modéliser le problème d'ordonnancement des activités de soins dans un CHT, nous avons investigué un certain nombre d'extensions du RCPSP : avec temps de montage, avec «time lag» mininaux, avec «time lag» conditionnels, MRCPSp, ... mais aucune de ces extensions ne permettait de prendre en compte l'aspect géographique de la gestion de projet avec la prise en compte de temps de déplacement entre sites et de ressources mobiles ou fixes. Nous avons donc proposé une nouvelle extension : le RCPSP multi-sites.

Une tâche est réalisée dans un site et comme pour le RCPSP classique nécessite un ensemble de ressources. Les ressources sont mobiles ou fixes. Une ressource fixe est affectée à un site et ne pourra réaliser une tâche que si celle-ci est réalisée sur le même site. Nous distinguons deux types de déplacement :

Déplacement d'une ressource mobile : une ressource mobile se déplace entre les sites moyennant un temps de déplacement lorsqu'elle réalise successivement deux tâches dans deux sites différents.

Déplacement entre deux tâches : lorsque deux tâches, reliées par une contrainte de précédence, ne sont pas réalisées sur le même site, un temps de déplacement doit être pris en compte. Ce temps de déplacement se traduit par un délai minimum entre la fin de la première tâche et le début de la seconde, égal au temps de déplacement entre les deux sites.

Aux notations du RCPSP de la section précédente, nous ajoutons :

- S , le nombre de sites,
- t_{s_1, s_2} , le temps de déplacement entre les sites s_1 et s_2 .
- $Rf_{k, s}$, le nombre de ressources fixes de type $k, k = 1, K$ disponibles sur le site $s, s = 1, S$,
- Rm_k , le nombre de ressources mobiles de type $k, k = 1, K$.

Exemple 2. La figure 2.3 donne un exemple d'ordonnancement avec 9 tâches décrites par le tableau 2.1 (les tâches A et I sont les tâches fictives de début et de fin de projet), 2 sites et 4 types de ressource disponibles en quantité 1 sauf pour la ressource R1 qui est disponible en quantité 2. Les ressources de type R1 et R2 sont des ressources mobiles (par exemple des ressources humaines) et les ressources de type R3 et R4 sont fixes (par exemple des équipements); celle de type R3 est sur le site 1 et celle de type R4 sur le site 2. La durée d'un déplacement entre deux sites est de 2 unités de temps. L'objectif de la figure est d'illustrer les deux types de déplacement à prendre en compte :

Déplacement entre deux tâches : les tâches B et C sont liées par une contrainte de précédence, la tâche B est réalisée sur le site 1 et la tâche C sur le site 2, ce qui induit un temps de déplacement entre la fin de B et le début de C.

Déplacement de ressources mobiles : la tâche E est réalisée sur le site 1 car elle utilise une ressource de type R3 qui est fixe sur le site 1. Elle utilise également une ressource de type R2 qui à la fin de la tâche C doit changer de site. De même pour la tâche F qui doit être réalisée sur le site 2 et demande le déplacement d'une ressource de type R1.

Tâche i	R1	R2	R3	R4	\mathcal{P}_i	d_i
B	2	0	1	0	-	2
C	0	1	0	1	G, B	3
D	2	0	1	0	B	4
E	0	1	1	0	D, C	2
F	1	0	0	1	D, C	2
G	0	1	0	1	-	3
H	1	0	0	0	D	4,5

TABLE 2.1 – Données de la figure 2.3

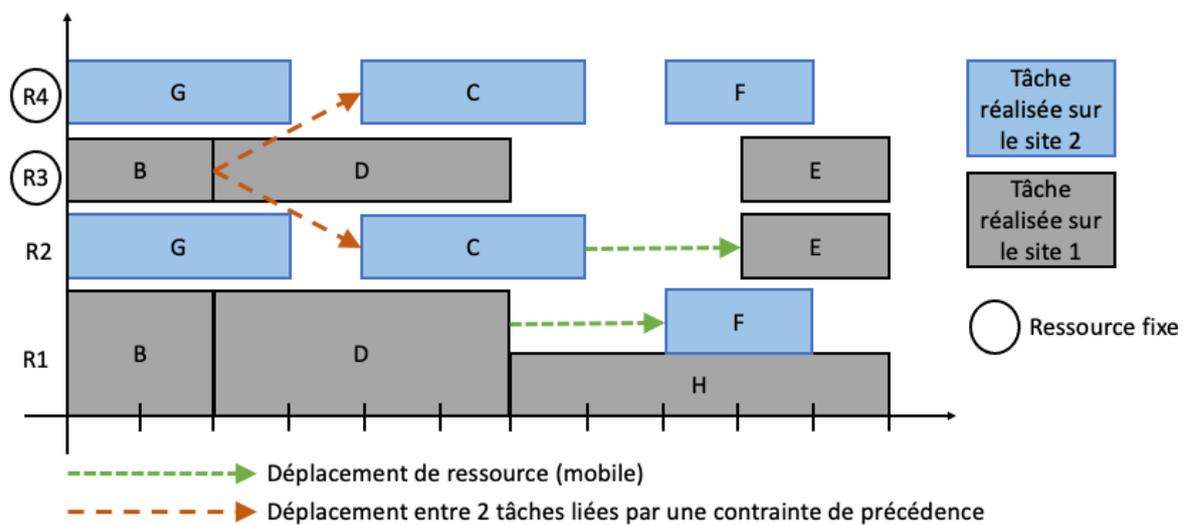


FIGURE 2.3 – Exemple d'ordonnancement incluant les temps de déplacement

2.3.2 Hybridations (métaheuristique \Leftrightarrow algorithme d'ordre strict)

La littérature sur les métaheuristiques et leurs hybridations pour le RCPS est très vaste (PELLERIN et al. 2020). La représentation de solution fréquemment rencontrée dans les métaheuristiques est une représentation selon une permutation de tâches respectant les contraintes de précédence (HARTMANN 1998). Mais d'autres représentations basées sur des listes de priorité existent (KOLISH 1996, VALLS et al. 2003), ...

Un algorithme de construction d'une solution, appelé Schedule Generation Scheme (SGS) est ensuite appliqué itérativement pour construire un ordonnancement en calculant les dates de début des tâches. Le principe est d'ordonner les tâches le plus tôt possible en respectant les contraintes de précédence et de disponibilité des ressources, dans l'ordre donné par la permutation. Autrement dit, si une tâche j précède une tâche i dans la permutation, alors i ne pourra pas être exécuté avant j par la même ressource. On distingue deux types d'application de l'algorithme SGS :

- en série : à chaque itération, la date de début d'une seule tâche est déterminée. KOLISH 1996 a montré que ce type d'algorithme conduit à des ordonnancements actifs.

- en parallèle : à chaque itération, la date de début de plusieurs tâches est déterminée. KOLISH 1996 a montré que les ordonnancements construits sont sans délai.

L'application en série de cet algorithme a également été appelé «algorithme d'ordre strict» par (CARLIER 1984 et CARLIER, MOUKRIM et al. 2008).

Première représentation de solution : permutation de tâches

Notre première représentation (LAURENT, DEROUSSI et al. 2017) s'inspire donc de la représentation fréquemment utilisée pour le RCPSP et plus généralement pour les problèmes d'ordonnement :

$$\sigma = (1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, N)$$

où σ est une permutation des N tâches respectant les contraintes de précédence. (1 et N sont les tâches fictives de début et de fin de projet).

L'espace des solutions correspondant à cette représentation reste de taille raisonnable et facile à parcourir grâce à un système de voisinage de type insertion (en respectant les contraintes de précédence).

L'algorithme de construction d'une solution se rapproche d'un modèle de simulation à événement discret car il doit non seulement déterminer la date de début de chaque tâche mais également l'affectation des tâches aux sites et aux ressources. En effet, pour chaque tâche σ_i à ordonner, l'algorithme de construction d'une solution calcule pour chaque site $s, s = 1, S$ sa date de début au plus tôt à partir :

- de la date de fin des tâches $j \in \mathcal{P}_{\sigma_i}$ qui la précèdent et des temps de déplacement nécessaires entre les sites qui leur sont affectés et le site s ,
- des dates de disponibilité au plus tôt des ressources nécessaires pour réaliser la tâche i et des temps de déplacement des ressources mobiles pour se rendre sur le site s .

Si le site s n'a pas les ressources fixes nécessaires à la tâche σ_i , la tâche σ_i ne pourra être réalisée sur le site s . L'algorithme va affecter la tâche au site qui peut la réaliser le plus tôt.

Malheureusement, nous nous sommes aperçus que certaines décisions prises par l'algorithme de construction de solution de manière gloutonne pouvaient conduire à des ordonnancements de mauvaise qualité. Cette constatation peut être illustrée par l'exemple suivant. De cet exemple, nous déduisons que certaines solutions optimales ne peuvent être représentées par une simple permutation de tâches.

Exemple 3. Soit l'instance décrite par la figure 2.4 et composée de 4 tâches, 2 sites et 2 types de ressources. La ressource $R1$ est mobile et la ressource $R2$ est fixe sur le site 2. Une solution optimale évidente (figure 2.5 à droite) consiste à affecter les tâches B et C au site 2, mais l'algorithme de construction, affecte la tâche B au premier site disponible dans l'ordre lexicographique, c'est à dire le site 1. Comme la ressource $R2$, utilisée par la tâche C est fixe sur le site 2, cette tâche est affectée au site 2, ce qui induit les deux types de déplacement : celui de la ressource $R1$ et celui dû à la contrainte de précédence entre les tâches B et C . L'ordonnement construit (figure 2.5 à gauche) reste actif mais nous voyons clairement que la décision d'affectation au site peut dépendre des contraintes induites par les tâches suivantes dans la permutation. Une piste d'amélioration serait l'introduction de procédures de backtracking dans l'algorithme de construction d'une solution.

Seconde représentation d'une solution : permutation de tâches et affectation des tâches aux sites

Partant de cette constatation, nous avons proposé (LAURENT, DEROUSSI et al. 2016) une seconde représentation basée sur une permutation de tâches et complété par l'affectation des tâches aux

Tâche i	R1	R2	\mathcal{P}_i
B	1		A
C	1	1	B

FIGURE 2.4

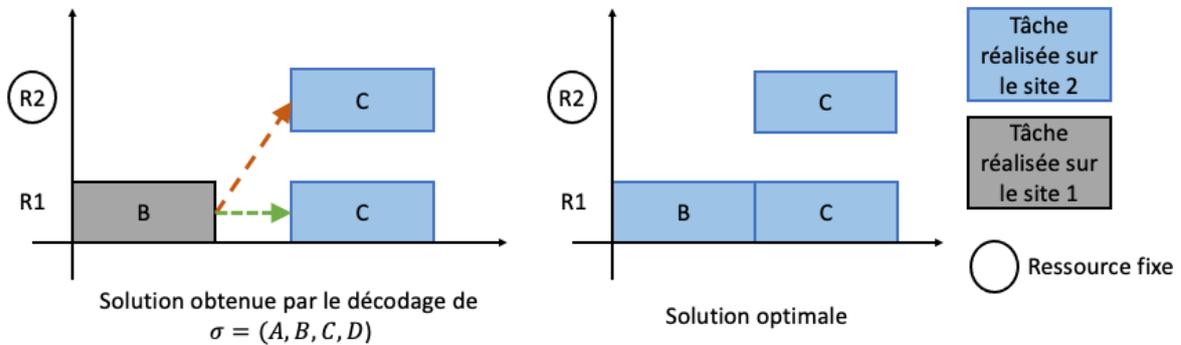


FIGURE 2.5 – Exemple 3

sites.

$$X = (\sigma, A)$$

où $A = (a_2, a_3, \dots, a_{N-1})$ et $a_i \in [1, S]$ est le site affecté à la tâche i . Pour que la représentation soit réalisable, l'ensemble des valeurs possibles pour a_i tient compte des ressources fixes nécessaires à la tâche i et des ressources fixes disponibles sur les sites.

L'algorithme de construction d'une solution est plus simple que l'algorithme précédent, car l'affectation des tâches aux sites est connue. Pour chaque tâche σ_i , il calcule sa date de début au plus tôt à partir :

- de la date de fin des tâches $j \in \mathcal{P}_{\sigma_i}$ qui la précèdent et des temps de déplacement nécessaires entre les sites qui leur sont affectés et le site a_{σ_i} ,
- des dates de disponibilité au plus tôt des ressources nécessaires pour réaliser la tâche σ_i et des temps de déplacement des ressources mobiles pour se rendre sur le site a_{σ_i} .

Comme pour la représentation précédente, nous nous sommes aperçus que certaines solutions optimales ne peuvent être représentées.

Exemple 4. Soit l'instance décrite par le tableau 2.2, composée de 8 tâches, 2 sites et 4 types de ressources. Les ressources de type R1 et R2 sont mobiles et disponibles en quantité 2. Les ressources de type R3 et R4 sont disponibles en quantité 1 et sont fixes : R3 sur le site 2 et R4 sur le site 1. Le temps de déplacement entre les deux sites est de 3 unités de temps.

Tâche i	d_i	R1	R2	R3	R4	\mathcal{P}_i
B	4		1			A
C	4	1			1	A
D	8		1	1		A
E	8	1				A
F	2	1	1	1		B, C
G	2	1	2		1	B, C

TABLE 2.2

La partie droite de la figure 2.6 donne une solution optimale avec un makespan de 9 unités de temps. Une représentation de cette solution optimale est $X = ((A, B, C, D, E, F, G, H), (2, 1, 2, 1, 2, 1))$. La solution construite en appliquant l'algorithme de construction d'une solution à X est représentée par la partie gauche de la figure 2.6 et a un makespan de 12 unités de temps. Cette différence vient de l'affectation de la tâche F à la première ressource de type R2 par l'application de l'ordre lexicographique dans les choix des ressources alors que l'affectation à la seconde ressource de type 2 permet de réaliser G plus tôt dans la solution optimale.

Nous pouvons cependant noter que l'application de l'algorithme de construction d'une solution à la représentation $X = (A, D, B, C, E, F, G, H), (2, 1, 2, 1, 2, 1)$ conduit à la solution optimale de la figure 2.6.

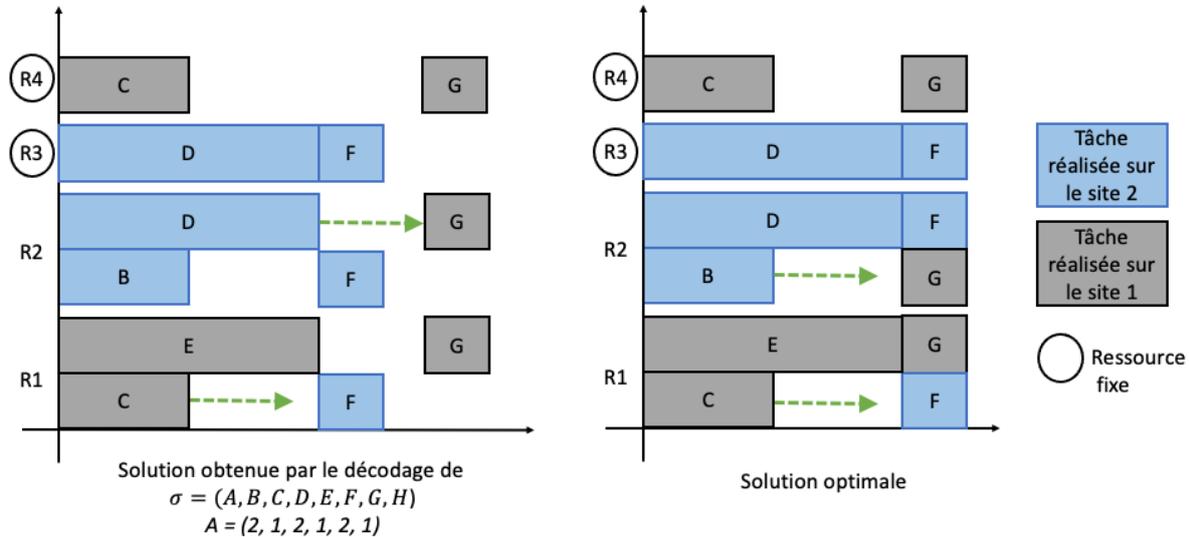


FIGURE 2.6 – Exemple 4

Troisième représentation d'une solution : permutation de tâches et affectation des tâches aux sites et aux ressources

Face à la nécessité d'individualiser les ressources, nous avons proposé (LAURENT, DEROUSI et al. 2017) une troisième représentation basée sur une permutation de tâches et complétée par l'affectation des tâches aux sites et des tâches aux ressources.

$$X = (\sigma, A, B)$$

où

- $A = (a_2, a_3, \dots, a_{N-1})$ et $a_i \in [1, S]$ est le site affecté à la tâche i . Pour que la représentation soit réalisable, l'ensemble des valeurs possibles pour a_i tient compte des ressources fixes nécessaires à la tâche i et des ressources fixes disponibles sur les sites.
- $B = (b_2, b_3, \dots, b_{N-1})$ et b_i est l'ensemble des ressources affectées à la tâche i . Cet ensemble, de taille $\sum_{k=1, K} r_{i,k}$, respecte la demande en ressources de la tâche i et tient compte du site a_i qui lui est affecté.

L'algorithme de construction d'une solution se réduit à de simples formules de calcul consistant à déterminer les dates de début au plus tôt des tâches.

Cette représentation permet de représenter n'importe quelle solution optimale. Par exemple, la solution de la partie droite de la figure 2.6 est représentée par :

$$X = ((A, B, C, D, E, F, G, H), (2, 1, 2, 1, 2, 1), ((0, 1, 0, 0), (1, 0, 0, 1), (0, 2, 1, 0), (2, 0, 0, 0), (1, 2, 1, 0), (2, 1, 0, 1)))$$

Systèmes de voisinage

Plus la représentation d'une solution est complète, plus l'espace des solutions va être grand. L'intérêt de la représentation σ est de permettre d'explorer un espace de recherche plus petit qu'avec la représentation (σ, A, B) . Cependant nous avons montré que les représentations (σ, A) et σ ne garantissent pas l'accessibilité à une solution optimale à cause de l'algorithme de construction d'une solution.

Pour parcourir l'espace des représentations, trois types de mouvements ont été proposés (LAURENT, DEROUSSI et al. 2017) :

Insertion : qui modifie σ en déplaçant une tâche choisie aléatoirement à une autre position dans σ tout en respectant les contraintes de précédence,

Site : qui modifie A , l'affectation des tâches aux sites, en changeant aléatoirement le site affecté à une tâche tout en vérifiant que les ressources fixes nécessaires à la réalisation de la tâche sont présentes sur le nouveau site.

Ressource : qui modifie B , l'affectation des tâches aux ressources, en changeant aléatoirement une ressource affectée à une tâche tout en vérifiant que les contraintes sur les ressources fixes sont vérifiées.

Le système de voisinage consiste à appliquer un mouvement selon une probabilité. Les mouvements utilisés dans le système de voisinage dépendent de la représentation utilisée. Le tableau 2.3 synthétise les mouvements à appliquer en fonction de la représentation utilisée ainsi que les probabilités qui ont été déterminées empiriquement.

Lorsque le mouvement **Site** est appliqué avec une représentation (σ, A, B) , une procédure de réparation doit modifier les ressources fixes affectées à la tâche pour prendre en compte les ressources disponibles sur le site affecté.

Représentation	Mouvement		
	Insertion	Site	Ressource
(σ)	100%		
(σ, A)	50%	50%	
(σ, A, B)	12,5%	12,5%	75%

TABLE 2.3 – Systèmes de voisinage en fonction de la représentation

2.3.3 Résultats

Trois métaheuristiques ont été utilisées : la recherche locale, la recherche locale itérée et le recuit simulé. Les expérimentations ont porté sur des instances créées à partir des instances de la PSPLIB avec 30, 60, 90, et 120 tâches.

Le tableau 2.4 présente les résultats obtenus par la recherche locale itérée qui est la métaheuristique qui a obtenu les meilleurs résultats avec 100 000 itérations. Nous voyons clairement que la représentation (σ, A, B) ne permet pas d'obtenir de bons résultats, ceci s'explique par la taille de l'espace des solutions à parcourir. De plus, même si la représentation (σ, A) obtient les meilleurs résultats pour les instances avec 30 tâches, la représentation (σ) obtient les meilleurs résultats pour les instances comportant plus de 60 tâches.

La représentation (σ) possède un espace de recherche de taille inférieure à celui de la représentation (σ, A) qui est également inférieur à celui de la représentation (σ, A, B) . Mais l'algorithme de construction d'une solution associé à la représentation (σ) est plus complexe et demande plus de temps de calcul que celui de la représentation (σ, A) qui demande plus de temps de calcul que

N	(σ)			(σ, A)			(σ, A, B)		
	min	moy	max	min	moy	max	min	moy	max
30	0	5,95	29,49	0	2,71	8,98	0	40,9	141,22
60	0	3,62	9,07	0	5,05	16,81	3,55	66,7	176,36
90	0	3,21	8,97	0	8,22	23,02	9,18	88,37	216,13
120	2,63	6,22	16,76	4,52	11,88	28,17	20,83	91,71	237,16

TABLE 2.4 – Erreur relative entre les résultats obtenus par la recherche locale itérée et la meilleure solution connue

celui de la représentation (σ, A, B) . Ainsi, pour un même temps de calcul, la métaheuristique avec la représentation (σ) va construire et évaluer moins de solutions mais dans un espace plus petit qu'avec la représentation (σ, A) . Afin d'affiner nos résultats, nous avons comparé les résultats obtenus par les 3 représentations en fonction du temps de calcul.

La figure 2.7 montre l'évolution du makespan obtenu par la recherche locale itérée en fonction du temps de calcul pour une instance avec 30 tâches. Nous constatons qu'au début de la résolution, la représentation (σ) obtient les meilleurs résultats par rapport à la représentation (σ, A) , la courbe pour la représentation (σ, A, B) est bien au dessus. Le même profil de courbes peut être obtenu pour les instances avec 60 et 90 tâches, mais au bout d'un certain temps la courbe correspondant à (σ) repasse en dessous. En conclusion, jusqu'à 90 tâches, le choix entre les représentations (σ) et (σ, A) dépend du temps de calcul que l'on souhaite accorder à la résolution. Au delà, la représentation (σ) est à privilégier.

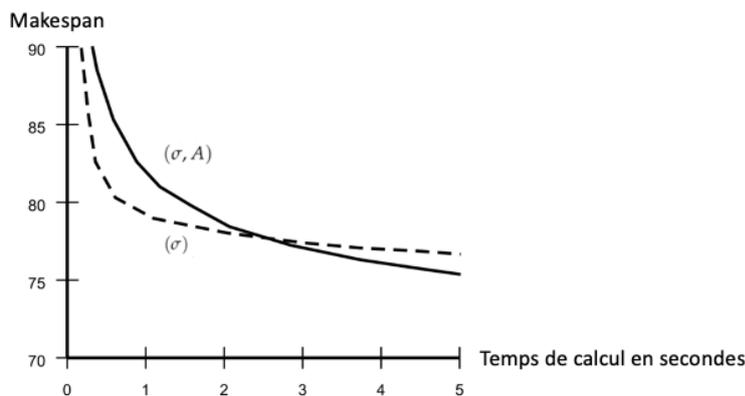


FIGURE 2.7 – Evolution du makespan en fonction du temps de calcul et de la représentation - 30 tâches

Pour se rapprocher de la problématique de la CHT, le modèle du RCPSP multi-sites a également été étendu pour prendre en compte d'autres contraintes : non-incidence (deux tâches ne peuvent pas se dérouler en même temps), disponibilité de ressources, compatibilité entre ressources et tâches, compabilité entre ressources. Les représentations, les algorithmes de construction de solutions et les systèmes de voisinage ont été adaptés pour prendre en compte ces nouvelles contraintes.

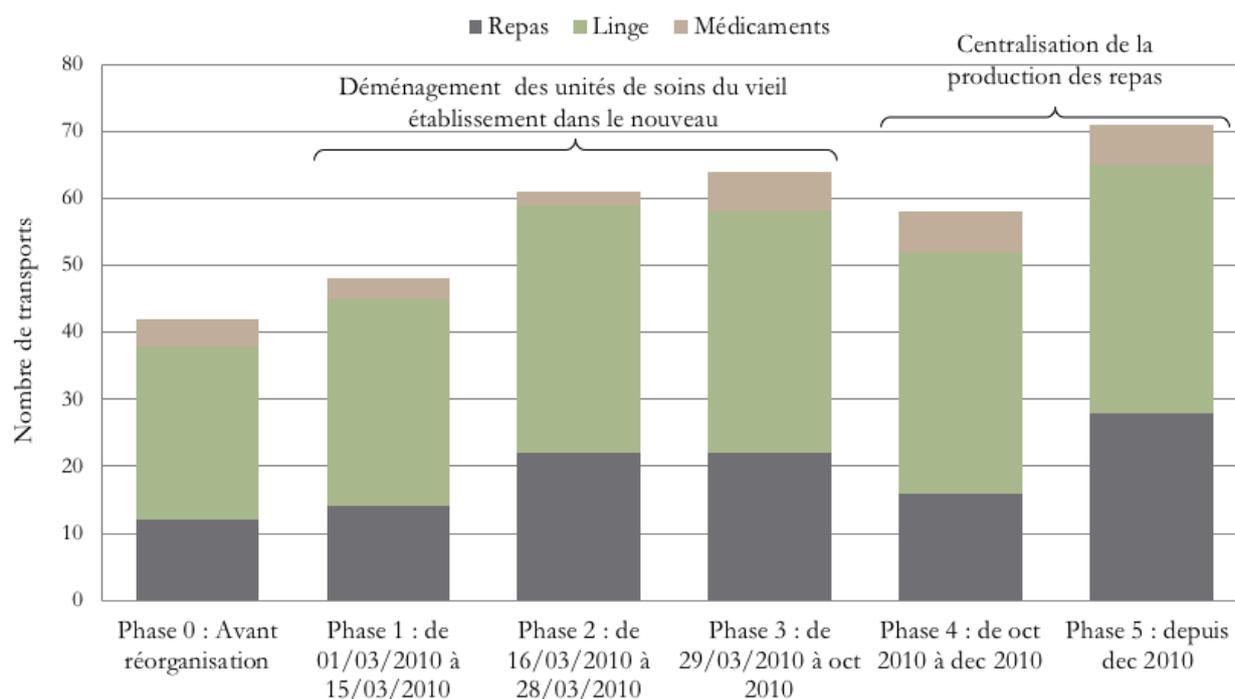


FIGURE 2.8 – Evolution du nombre d'activités de transport

2.4 Ordonnancement d'activités de livraison-collecte dans un réseau de soins

Dans les années 2010, le Centre Hospitalier Universitaire (CHU) de Clermont-Ferrand a connu une profonde mutation autour de la construction d'un nouvel hôpital (Hôpital Estaing) qui s'est accompagnée de la réorganisation des services de soins, la fermeture d'un hôpital, la centralisation de la production des repas, du nettoyage du linge, de la pharmacie et la prestation de services auprès d'établissements partenaires. Une collaboration entre le LIMOS et le CHU de Clermont-Ferrand intitulée « Modélisation du Nouvel Hôpital Estaing (projet NHE) » a permis de travailler sur la proposition de modèles pour le dimensionnement et l'organisation logistique du futur hôpital.

Dans le cadre de la thèse de Virginie André (ANDRÉ 2011), nous nous sommes intéressées aux flux de produits hôteliers (repas et linge) et de médicaments pour lesquels il a fallu trouver une réorganisation à chaque phase de la transformation du paysage hospitalier clermontois. La figure 2.8 présente l'évolution du nombre d'activités de transport à réaliser par semaine, pour chaque type de produit et chaque phase de transformation. Les augmentations s'expliquent d'une part par le déménagement des unités de soins dans un hôpital dépourvu de cuisine relais, de blanchisserie et de pharmacie et d'autre part par la centralisation dans une unique Unité Centrale de Production Alimentaire (UCPA) en remplacement des cuisines présentes dans chaque site, la centralisation du nettoyage du linge dans une nouvelle et unique blanchisserie et la centralisation du stockage des médicaments dans une pharmacie unique.

Dans un premier temps, à la demande du CHU de Clermont-Ferrand, nous nous sommes intéressées au problème de livraison-collecte des repas avec de nombreuses hypothèses simplificatrices concernant les ressources nécessaires à la réalisation des activités. Ce problème a été modélisé par un RCPSP avec temps de montage dépendant de la séquence et résolu par la programmation linéaire (ANDRÉ, GRANGEON, NORRE et PHILIPPE 2012). Les enjeux concernaient le dimensionnement de la flotte de véhicules : renouvellement d'une partie de la flotte et gabarit des véhicules.

Les résultats ont montré que les autres flux de produits devaient être pris en compte, en particulier au niveau des quais de chargement et de déchargement présents en nombre insuffisant au niveau des sites à certains moments de la journée.

Nous nous sommes donc intéressées au problème de livraison-collecte de tous les produits (repas, linge, médicament) en prenant en compte un plus grand nombre de types de ressources, c'est ce problème qui sera détaillé dans la suite. Pour finir, nous avons considéré un problème de dimensionnement et de constitution des plannings journaliers des chauffeurs, car les résultats obtenus précédemment ont montré qu'un changement global de l'organisation établie était nécessaire (ANDRÉ, GRANGEON, NORRE et PHILIPPE 2011b).

2.4.1 Le problème d'ordonnancement d'activités de livraison-collecte

Le CHU est composé de nombreuses unités fonctionnelles qui appartiennent à un pôle défini en fonction de sa spécialité médicale (pédiatrie, chirurgie maxillo-faciale,...) ou de sa spécialité technique (achats, maintenance, production,...). A ces unités fonctionnelles, s'ajoutent des établissements externes n'appartenant pas au CHU mais bénéficiant d'un certain nombre de services proposés par celui-ci. Nous nommons « **sites de consommation** » les unités fonctionnelles et les établissements externes qui utilisent des produits nécessaires à leurs activités et « **sites de production** » les unités fonctionnelles qui ont en charge la fabrication de ces produits et l'approvisionnement des sites de consommation.

Le Pôle Logistique Intégré du CHU a la responsabilité d'assurer les transports des produits entre les sites de production et les sites de consommation. Les produits sont livrés aux sites de consommation dans des contenants qui doivent être retournés aux sites de production pour nettoyage et réutilisation. Nous avons identifié deux types d'activité de transport :

distribution de contenants propres (DCP) qui doit être réalisée avant une date définie par les sites de consommation ;

retour de contenants sales (RCS) qui est aussi soumis à une date définie par les sites de production.

Une activité de transport est caractérisée par un site-origine et un site-destination et nécessite un chauffeur et un véhicule. Dans le cas d'une DCP, le site origine est un site de production et le site-destination un site de consommation. Dans le cas d'un RCS, le site-origine est un site de consommation et le site-destination un site de production.

L'objectif est de construire un planning pour chaque jour de la semaine (du lundi au samedi) en déterminant pour chaque activité sa date de début ainsi que les ressources nécessaires à sa réalisation de manière à respecter ces dates limites de distribution et de retour.

Une activité de transport est composée de 5 étapes qui utilisent le même contenant et ont une durée connue :

— distribution de contenant propre (figure 2.9) :

étape 1 le remplissage du contenant qui nécessite une ligne de production,

étape 2 le chargement du contenant dans le véhicule qui nécessite un chauffeur, un quai de chargement sur le site de production et un véhicule,

étape 3 le transport du contenant du site de production au site de consommation qui nécessite le chauffeur et le véhicule de l'étape 2,

étape 4 le déchargement du contenant au site de consommation qui requiert un quai de déchargement sur le site de consommation, le chauffeur et le véhicule des étapes 2 et 3,

étape 5 la consommation du contenant sur le site de consommation.

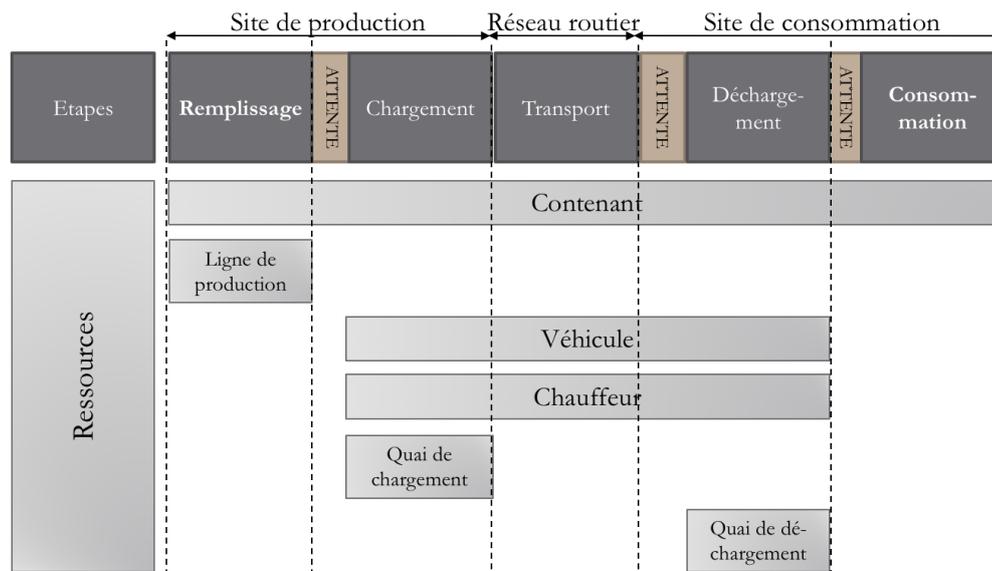


FIGURE 2.9 – Activité de distribution contenant propre

— retour de contenant sale (figure 2.10) :

étape 6 le ramassage et l'acheminement du contenant au quai de chargement du site de consommation,

étape 7 le chargement du contenant dans le véhicule qui nécessite un chauffeur, un quai de chargement sur le site de consommation et un véhicule,

étape 8 le transport du contenant du site de consommation au site de production qui nécessite le chauffeur et le véhicule de l'étape 7,

étape 9 le déchargement du contenant au site de production qui requiert un quai de déchargement sur le site de production, le chauffeur et le véhicule des étapes 7 et 8,

étape 10 le nettoyage d'un contenant sur le site de production qui utilise une aire de nettoyage.

Il peut exister des contraintes de précédence entre deux activités : le retour du contenant sale ne peut avoir lieu qu'après la distribution du contenant propre si les deux activités se déroulent dans la même journée.

Les ressources fixes sont :

- les lignes de production et les aires de nettoyage présentes en nombre limité dans les sites de production et caractérisées par un planning d'ouverture,
- les quais de chargement et de déchargement présents en nombre limité dans les sites de production et de consommation.

Les ressources mobiles sont :

- les contenants, disponibles en nombre limité, qui servent à acheminer les produits.
- les véhicules disponibles en nombre limité et caractérisés par un type (isotherme ou standard) et un gabarit (petit ou grand). Le type et le gabarit du véhicule utilisé dépendent du type de produit transporté et des sites impliqués dans le transport.
- les chauffeurs. Chaque chauffeur est caractérisé par un planning de travail (deux périodes incluant une pause pour les temps pleins ou une seule période pour les mi-temps), peut conduire n'importe quel véhicule et peut changer plusieurs fois de véhicule lors d'une journée de travail.

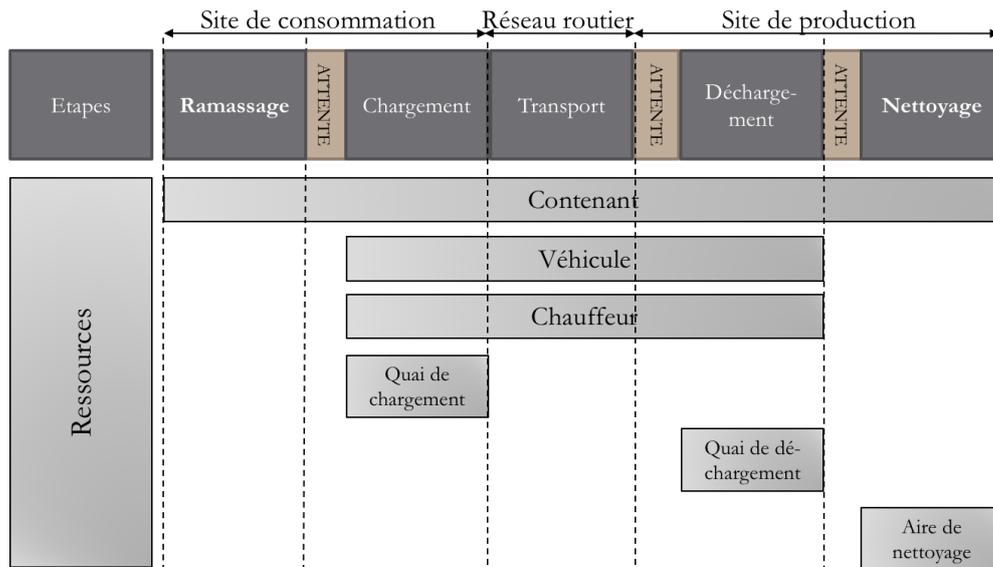


FIGURE 2.10 – Activité de retour d'un contenant sale

A cela, nous ajoutons un dépôt où se retrouvent les véhicules et les chauffeurs lorsqu'ils ne sont pas utilisés. Ainsi, lorsqu'un chauffeur doit changer de véhicule, il doit se rendre au dépôt pour réaliser l'échange.

Des contraintes additionnelles doivent être considérées :

Non libération de ressources entre 2 étapes : au sein d'une activité, certaines ressources ne sont pas libérées, comme le montrent les figures 2.9 et 2.10 et des temps d'attente peuvent être nécessaires lorsque certaines ressources ne sont pas disponibles.

Trajet à vide : les chauffeurs et les véhicules doivent réaliser des trajets à vide dans les cas suivants :

Entre deux activités consécutives avec le même véhicule mais la destination de la première activité est différente de l'origine de la seconde,

Départ du dépôt avant la première activité à réaliser dans la période de travail : le véhicule utilisé pour l'activité et le chauffeur doivent alors faire le trajet entre le dépôt et le site origine de la première activité,

Retour au dépôt après la dernière activité affectée à une période de travail : un trajet à vide doit être réalisé afin de ramener le véhicule et le chauffeur du site de destination de la dernière activité vers le dépôt,

Changement de véhicule entre deux activités qui utilisent deux véhicules différents : deux trajets à vide doivent être réalisés, le premier pour ramener le véhicule de la destination de la première activité au dépôt et le second du dépôt à l'origine de la seconde activité pour l'autre véhicule.

Ces trajets à vide constituent des étapes supplémentaires, de durée connue, qui dépendent de la séquence et de l'affectation des activités aux différentes ressources.

La non libération des ressources entre 2 étapes correspond à l'extension « Profil de demande en ressource variable » alors que les trajets à vide vont demander d'individualiser les ressources mobiles pour prendre en compte leur localisation géographique.

L'objectif est de construire un ordonnancement respectant toutes les contraintes liées aux dates : date de début au plus tôt et date de fin souhaitée des activités, période de travail des chauffeurs, planning d'ouvertures des lignes de production et des aires de nettoyage.

2.4.2 Couplage (métaheuristique \rightleftharpoons modèle de simulation)

Représentation d'une solution

Après plusieurs tentatives de représentation, nous avons identifié la nécessité de travailler sur une représentation permettant d'affecter les activités aux chauffeurs et de déléguer l'affectation des autres ressources à la procédure de construction d'une solution. Il s'agit alors de répartir toutes les activités de transports entre les chauffeurs et d'ordonner les activités de chaque chauffeur tout en minimisant le retard des activités et les heures supplémentaires des chauffeurs. Nous avons donc opté pour une représentation sous la forme de plusieurs permutations d'activités (ANDRÉ, GRANGEON, NORRE et PHILIPPE 2011a, ANDRÉ, GRANGEON et NORRE 2013) :

$$X = (\sigma_{(1)}, \sigma_{(2)}, \dots, \sigma_{(M)})$$

où M est le nombre de chauffeurs (et plus précisément de périodes de travail) et $\sigma_{(j)}$ est la permutation des activités affectées au chauffeur j .

Construction d'une solution à l'aide d'un modèle de simulation

Le principe de l'algorithme de construction d'une solution est similaire aux algorithmes d'ordre strict mentionnés précédemment : l'objectif est de calculer les dates de début (et de fin) de chaque étape de chaque activité tout en prenant en compte le grand nombre de ressources. Cependant, devant la complexité du système à évaluer, nous nous sommes orientés vers un modèle de simulation à événements discrets dirigé par événement.

A partir de la liste des activités affectées aux chauffeurs, un graphe de précedence constitué de toutes les étapes à réaliser ainsi que des transports à vide est construit. Une étape ne peut débiter que lorsque :

- les ressources nécessaires à son traitement sont disponibles,
- la date de début au plus tôt est atteinte,
- toutes les étapes qui la précèdent, sont réalisées.

Ainsi chaque chauffeur réalise les activités strictement dans l'ordre dans lequel elles lui sont affectées.

A partir de la date de fin de chaque étape, nous pouvons déduire les indicateurs concernant :

- les activités : date de fin, retard, réalisée ou non réalisée,
- les chauffeurs : date de fin de travail effectif, heures supplémentaires,
- les ressources : taux d'occupation, temps d'attente, ...

Système de voisinage

Le système de voisinage est basé sur deux mouvements équiprobables :

- Insertion : une activité est déplacée à une nouvelle position soit dans la même permutation, soit dans une autre permutation tout en veillant à respecter les contraintes de précedence entre les activités,
- Echange : deux activités sont échangées tout en veillant à respecter les contraintes de précedence entre les activités, ces deux activités sont soit dans la même permutation soit dans deux permutations différentes.

Ainsi, si on fait le lien avec les problèmes de tournée de véhicules, les mouvements sont de deux types :

- mouvements intra-tournée : il s'agit de déplacer une activité (insertion) ou deux activités (échange) dans la même permutation d'activités tout en veillant à respecter les contraintes de précedence entre les activités ;

- mouvements inter-tournées : il s'agit de déplacer une activité (insertion) ou deux activités (échange) d'une permutation d'activités à une autre permutation d'activités tout en veillant à respecter les contraintes de précédence entre les activités.

Critères de performance

Une solution est dite « réalisable » si :

- Toutes les activités sont réalisées. Des activités ne sont pas réalisées lorsqu'une ressource nécessaire n'est plus disponible car demandée en dehors de son planning d'ouverture. Plus précisément, une activité DCP est non réalisée lorsque le déchargement a lieu après la fermeture du site de consommation et une activité RCS est non réalisée lorsque la fin du nettoyage a lieu après la fermeture de l'aire de nettoyage.
- Le nombre d'heures supplémentaires n'excède pas 10 minutes pour chaque chauffeur. Un chauffeur a des heures supplémentaires quand sa feuille de route se termine après la fin de sa période de travail.
- Les retards sont raisonnables (en fonction de l'activité). Une activité est en retard lorsque la quatrième étape se termine après la date de fin souhaitée.

Chaque solution est évaluée selon trois critères :

$H1(X)$: le nombre d'activités non réalisées pondéré par $24 * 60$ qui est un équivalent en minutes d'une activité considérée comme étant réalisée le lendemain.

$H2(X)$: la somme des retards de livraison (exprimés en minutes) au site de consommation,

$H3(X)$: la somme des heures supplémentaires (exprimées en minutes) réalisées par les chauffeurs.

Le critère $H1(X)$ étant prioritaire par rapport aux deux autres, nous avons opté pour une hiérarchisation des critères sous la forme :

$$H(X) = H1^2(X) + \alpha_1 H2^2(X) + \alpha_2 H3^2(X)$$

α_1 et α_2 sont des poids choisis en fonction de l'importance accordée par le décideur aux critères $H2$ et $H3$.

2.4.3 Résultats

L'approche proposée a été validée en comparant les résultats avec ceux obtenus par la résolution d'un modèle mathématique sur des instances de petite taille (ANDRÉ, GRANGEON, NORRE et PHILIPPE 2012). Nous avons ensuite utilisé la métaheuristique pour résoudre un problème de dimensionnement du nombre de chauffeurs nécessaires pour réaliser toutes les activités de transport. Nous nous sommes en particulier intéressés à l'impact du mode de travail des chauffeurs à savoir dédiés à un seul type de produit ou polyvalents. Pour finir, nous avons travaillé sur la réorganisation des activités de transport pour l'ensemble des transformations structurelles du CHU (déménagements, construction, transferts,...).

Impact du mode de travail des chauffeurs

Historiquement, l'activité des chauffeurs était dédiée à un seul type de produit : un chauffeur assurait soit le transport des repas avec les véhicules de type réfrigéré, soit le transport du linge et des médicaments avec les véhicules de type standard. Cependant, la réorganisation et la perspective d'embauche de personnel ont permis d'envisager la polyvalence des chauffeurs.

Nous sommes partis d'une organisation prévisionnelle proposée par le CHU avec 4 chauffeurs à temps plein pour 22 activités de livraison des repas et 5 chauffeurs à temps plein pour 39 activités de livraison du linge et des médicaments. Pour l'hypothèse de chauffeurs dédiés, nous avons

amélioré l'organisation prévisionnelle avec un poste à mi-temps de moins pour la livraison du linge et des médicaments. Concernant les chauffeurs polyvalents, nous obtenons des solutions avec 8 chauffeurs que nous ne pouvions pas obtenir avec des chauffeurs dédiés.

Toutes les solutions mentionnées ont été validées par le CHU. Cette première étude a permis de convaincre de l'intérêt de changer les pratiques

Réorganisation des activités de transport

Nous avons repris l'ensemble des phases de réorganisation et cela a conduit à une trentaine d'instances pour lesquelles le nombre d'activités varie de 12 à 70. Pour chaque instance, le nombre de chauffeurs et les plannings de travail ont été fixés par le CHU.

Que l'on considère des chauffeurs dédiés ou polyvalents, très peu de solutions réalisables ont été obtenues. L'analyse des résultats nous a permis de conclure que les plannings proposés n'étaient pas adaptés. Afin de montrer la pertinence de la détermination des plannings des chauffeurs, nous avons repris des instances pour lesquelles aucune solution réalisable n'avait été obtenue avec les plannings proposés par le CHU et avons mis en œuvre notre méthode avec d'autres plannings et des solutions réalisables ont été construites.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une partie de nos travaux sur les problèmes d'ordonnancement intégrant un aspect multi-sites. Cette extension d'un problème abondamment étudié dans la littérature, intègre un aspect géographique qui nécessite de prendre en compte des temps de déplacement pour déterminer les dates de début des tâches. Cette extension trouve ses applications dans le domaine hospitalier, au niveau d'un territoire pour les Communautés Hospitalières de Territoires ou les Groupements Hospitaliers de Territoires mais également au niveau local pour le CHRU de Clermont-Ferrand. Des projets de réorganisation similaires à celui que nous avons étudié dans la thèse de Virginie André sont actuellement initiés au CHRU de Tours. D'autres applications existent dès lors que la mutualisation de ressources doit être considérée et qu'un temps de déplacement entre des sites est non négligeable, par exemple, des ressources de production mutualisées entre plusieurs sites de production ou des ressources informatiques dans une grille de calcul.

Plusieurs approches ont été considérées, mêlant des métaheuristiques et des algorithmes d'ordre strict plus ou moins complexes ou des modèles de simulation. Pour toutes ces approches, la représentation d'une solution est basée sur un échange de tâches mais nous avons montré qu'il est nécessaire de considérer l'affectation des tâches à une partie des ressources. En effet, pour les problèmes présentés, le simple échange de tâches délègue l'intégralité du choix de l'affectation des tâches aux ressources à un algorithme de liste qui prend des décisions de manière gloutonne. Nous avons choisi de travailler sur la représentation de la solution pour rendre nos métaheuristiques plus efficaces, mais une autre piste de recherche pourrait être la définition de règles de gestion plus « intelligentes ».

Références

- PRITSKER, A., L. WATTERS et P. WOLFE (1969). « Multiproject Scheduling with Limited Resources : A Zero-One Programming Approach ». In : *Management Science* 16.1, p. 93-108.
- CARLIER, J. et P. CHRÉTIENNE (1982). « Un domaine très ouvert : les problèmes d'ordonnancement ». In : *RAIRO Operational research* 16.3, p. 175-217.

- BLAZEWICZ, J., J. LENSTRA et A. KAN (1983). « Scheduling subject to resource constraints : classification and complexity ». In : *Discrete Applied Mathematics* 5.1, p. 11-24.
- CARLIER, J. (1984). « Problème à contraintes de ressources : algorithmes et complexité ». Thèse de doct. d'état, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) (France).
- GOTHA (1993). « Les problèmes d'ordonnancement ». In : *RAIRO Operational research* 27.1, p. 77-150.
- KOLISH, R. (1996). « Serial and parallel resource-constrained project scheduling methods revisited : Theory and computation ». In : *European Journal of Operational Research* 90, p. 320-333.
- HARTMANN, S. (1998). « A Competitive Genetic Algorithm for Resource-Constrained Project Scheduling ». In : *Naval Research Logistics* 45, p. 733-750.
- HERROELEN, W., B. DEREYCK et E. DEMEULEMEESTER (1998). « Resource-constrained project scheduling : A survey of recent developments ». In : *Computers & Operations Research* 25.4, p. 279-302.
- BRUCKER, P., A. DREXL, R. MÖHRING, K. NEUMANN et E. PESCH (1999). « Resource-constrained project scheduling : notation, classification, models, and methods ». In : *European Journal of Operational Research* 112, p. 3-41.
- BOUDEVIN, C. (2003). « Problèmes d'ordonnancement et d'affectation avec contraintes de ressources de type RCPSP et line balancing ». Thèse de doct. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
- VALLS, V., S. QUINTANILLA et F. BALLESTIN (2003). « Resource-constrained project scheduling : A critical activity reordering heuristic ». In : *European Journal of Operational Research* 149, p. 282-301.
- HERROELEN, W. et R. LEUS (2005). « Project scheduling under uncertainty : Survey and research potentials ». In : *European Journal of Operational Research* 165, p. 289-306.
- NORRE, S. (2005). « Heuristiques et métaheuristiques pour la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire dans les systèmes de production ». HdR, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
- ARTIGUES, C., S. DEMASSEY et E. NERON (2008). *Resource-Constrained Project Scheduling : Models, Algorithms. Extensions and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd.
- CARLIER, J., A. MOUKRIM et H. XU (2008). « Project Scheduling with Production and Consumption of Resources : HowtoBuildSchedules ». In : *Resource-Constrained Project Scheduling : Models, Algorithms. Extensions and Applications*. Sous la dir. de C. ARTIGUES, S. DEMASSEY et E. NERON. 10. John Wiley & Sons, Ltd. Chap. Project Scheduling with Production and Consumption of Resources : HowtoBuildSchedules.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2008). « Assembly Shop Scheduling ». In : *Resource-Constrained Project Scheduling Models, algorithms, extensions and applications*. Sous la dir. de C. ARTIGUES, S. DEMASSEY et E. NERON. John Wiley & Sons, Ltd. Chap. 15.
- HARTMANN, S. et D. BRISKORN (2010). « A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem ». In : *European Journal of Operational Research* 207, p. 1-14.
- ANDRÉ, V., N. GRANGEON, S. NORRE et F. PHILIPPE (2011a). « A combination metaheuristic-simulation for solving a transportation problem in a hospital environment ». In : *IESM'11, 25 au 27 mai 2011, Metz, France*.
- ANDRÉ, V., N. GRANGEON, S. NORRE et F. PHILIPPE (2011b). « Dimensionnement et constitution des plannings journaliers pour un problème de transport hospitalier ». In : *JDJN-Macs 2011, Marseille (France), 9-10 juin 2011*.
- ANDRÉ, V. (2011). « Problème de livraison-collecte dans un environnement hospitalier : méthodes d'optimisation, modèles de simulation et couplages ». Thèse de doct. décembre : Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
- ANDRÉ, V., N. GRANGEON, S. NORRE et F. PHILIPPE (2012). « RCPSP et temps de montage dépendant de la séquence pour la modélisation et la résolution d'un problème de livraison collecte ». In : *MOSIM 2012, 06-08 Juin 2012, Bordeaux*.

- ANDRÉ, V., N. **GRANGEON** et S. NORRE (2013). « Combination of a Metaheuristic and a Simulation Model for the Scheduling of Resource-constrained Transport Activities ». In : *Metaheuristics for Production Scheduling*. John Wiley & Sons. Chap. 15.
- SCHWINDT, C. et J. ZIMMERMANN (2015). *Handbook on Project Management and Scheduling*. Springer, Cham.
- LAURENT, A., L. DEROUSSI, N. **GRANGEON** et S. NORRE (2016). « Modèle mathématique et méta-heuristiques pour un problème d'ordonnancement et d'affectation de ressources dans une communauté hospitalière de territoire ». In : *JESA : Pilotage de la chaîne logistique dans un contexte de développement durable* 49.6, p. 677-702.
- LAURENT, A., L. DEROUSSI, N. **GRANGEON** et S. NORRE (2017). « Comparison of Three Solution Encodings and Schedule Generation Scheme for the Multi-Site RCPSP ». In : *IFAC 2017 (International Federation of Automatic Control World Congress), Toulouse (France), juillet 2017*.
- LAURENT, A. (2017). « Proposition et étude d'une extension du RCPSP pour la Mutualisation entre plusieurs sites : définition, formalisation, méthodes exactes et méta-heuristiques ». Thèse de doct. Université Clermont Auvergne.
- BASSET, M., A. ATEF et A. ZAIED (2020). « Constrained project scheduling problem : a survey of recent investigations ». In : *International Journal of Operational Research* 39.1.
- BENISSA, S. et Y. TU (2020). « A survey in the resource-constrained project and multi-project scheduling problems ». In : *Journal of Project Management* 5.2, p. 117-138.
- PELLERIN, R., N. PERRIER et F. BERTHAUT (2020). « A survey of hybrid metaheuristics for the resource-constrained project scheduling problem ». In : *European Journal of Operational Research* 280, p. 395-416.

Chapitre 3

Extensions du problème du voyageur de commerce multiple

Sommaire

3.1 Introduction	87
3.2 Tournées de véhicules avec contraintes de synchronisation	89
3.2.1 Contexte du maintien à domicile	89
3.2.2 Synchronized m-TSP with Time Windows	90
3.2.3 Couplage (métaheuristique \rightleftharpoons modèle de simulation)	91
3.2.4 Hybridation (métaheuristique \rightleftharpoons algorithme d'ordonnancement de projet)	92
3.2.5 Résultats	94
3.3 Livraison urbaine avec drones et véhicules	98
3.3.1 Intégration des drones dans la livraison du dernier kilomètre	98
3.3.2 Présentation du Parallel Drone Scheduling Traveling Salesman Problem	100
3.3.3 Hybridation (métaheuristique \rightleftharpoons programmation dynamique)	101
3.3.4 Résultats	103
3.4 Conclusion	105
Références	106

3.1 Introduction

« Un voyageur de commerce doit visiter une et une seule fois un nombre fini de villes et revenir à son point d'origine. Il s'agit de trouver l'ordre de visite des villes qui minimise la distance totale parcourue par le voyageur. »

Toute personne qui se confronte un jour à la recherche opérationnelle croise nécessairement sur son chemin le problème du voyageur de commerce (ou TSP pour Travelling Salesman Problem). La simplicité de son énoncé rend le problème facilement compréhensible par un large public et de nombreuses notions telles que la complexité, l'optimisation combinatoire, les cycles ou circuits hamiltoniens, les heuristiques gloutonnes et d'amélioration, la génération de coupes, ... peuvent être illustrées.

Posé à la fin du 19^{ème} siècle sous la forme d'un jeu par William Rowan Hamilton, ce problème a été étudié par de nombreux chercheurs et continue d'être un sujet de recherche. Les domaines d'application sont nombreux notamment en logistique et en transport aussi bien de marchandises que de personnes. Dans l'industrie, certains problèmes se modélisent sous la forme d'un problème de voyageur de commerce, comme l'optimisation de trajectoires de machines-outils : comment percer plusieurs points sur une carte électronique le plus vite possible ?

Le problème est généralement modélisé sous la forme d'un graphe complet valué. L'étude de ce problème a fait émerger un certain nombre de méthodes généralisables à d'autres problèmes. Par exemple, nous pouvons citer les contraintes d'élimination des sous-tours lors d'une modélisation en programmation linéaire, des heuristiques simples à programmer telles que l'algorithme du plus proche voisin et l'algorithme 2-opt qui a conduit à des mouvements efficaces pour les métaheuristiques.

Parmi les extensions du problème de voyageur de commerce, nous pouvons citer :

- mTSP : plusieurs voyageurs de commerce (ou véhicules) sont considérés et il s'agit d'affecter les villes aux voyageurs. Certains auteurs parlent de généralisation du problème de voyageur de commerce (CHEIKHROUHOU et KHOUI 2021). Des extensions récentes intègrent également des types de véhicules tels que les drones (MURRAY et CHU 2015).
- TSPTW (Travelling Salesman Problem with Time Windows) : des fenêtres de temps définies pour chaque sommet contraignent l'arrivée du voyageur à chaque sommet. Dans ce cas, les temps de trajet, de service doivent être pris en compte et les dates d'arrivée et de départ du voyageur à chaque sommet doivent être calculées.
- eTSP (electric Travelling Salesman Problem) : une extension toute récente dans laquelle le véhicule électrique dispose d'une batterie de capacité limitée et la tournée doit passer par des stations de recharge (PELLETIER et al. 2016).

Lorsque la capacité du véhicule est prise en compte, le problème du voyageur de commerce devient un problème de tournée de véhicules ou VRP (Vehicle Routing Problem). (DANTZIG et RAMSER 1959) ont été les premiers à introduire le « Truck Dispatching Problem » en modélisant la manière dont une flotte de véhicules homogènes pouvait répondre à la demande en pétrole d'un certain nombre de stations-service à partir d'une plate-forme centrale avec une distance minimale à parcourir. Cinq ans plus tard, (CLARKE et WRIGHT 1964) ont généralisé ce problème au VRP selon l'énoncé : comment servir un ensemble de clients, géographiquement dispersés autour du dépôt central, à l'aide d'une flotte de véhicules de capacités variables.

Le TSP, le VRP et leurs nombreuses extensions (PDP, DARP, ...) sont des problèmes liés entre eux par la notion de tournée et peuvent être regroupés dans la catégorie des problèmes de tournées sur noeud (par opposition aux problèmes de tournées sur arc). Nous nous sommes intéressés à deux extensions intégrant la notion de type de véhicules :

- un problème de mTSP avec contraintes de synchronisation et fenêtres de temps. Ce problème est issu du contexte du maintien à domicile dans lequel des soignants réalisent des tournées auprès de patients et dans certains cas, deux soignants sont nécessaires au même moment. Plusieurs types de soignants sont distingués. Deux approches ont été proposées, l'une utilisant une représentation indirecte et un modèle de simulation avec des règles de gestion et l'autre une représentation directe et un algorithme d'ordonnancement de projet adapté aux contraintes de fenêtres de temps. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Fabrice Gayraud (GAYRAUD 2015).
- un problème de mTSP avec plusieurs types de véhicules, combinant des véhicules classiques et des drones. Ce problème s'intéresse à la livraison du dernier kilomètre grâce à la livraison combinée par véhicules et drones : les véhicules prennent en charge un sous-ensemble de clients et les drones les clients restants. L'approche proposée est basée sur l'approche Route First - Cluster Second proposée par (BEASLEY 1983), grâce à un algorithme de programmation dynamique pour la répartition des clients entre les véhicules et les drones. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Raïssa Saleu (SALEU 2021).

3.2 Tournées de véhicules avec contraintes de synchronisation

Les Services de Soins Infirmiers A Domicile (SSIAD) et les services d'Hospitalisation A Domicile (HAD) sont des structures de maintien à domicile qui visent à éviter une hospitalisation. Elles permettent aux patients d'avoir des soins médicaux et paramédicaux chez eux.

Les SSIAD sont des établissements sociaux et médico-sociaux qui ont pour objectif de maintenir le plus longtemps possible l'autonomie des patients à leur domicile et d'aider les personnes dépendantes à mieux vivre au quotidien. Cette structure intervient auprès des personnes âgées et des personnes handicapées. L'évaluation de la perte d'autonomie s'effectue à l'aide de la grille AGGIR (Autonomie, Gérontologie, Groupes Iso-Ressources) selon 6 niveaux de dépendance compris entre 1 et 6. Le niveau 1 correspond à une perte d'autonomie totale. A l'opposé, le niveau 6 correspond à une parfaite autonomie.

Les services de HAD sont des structures de soins alternatives à l'hospitalisation qui permettent d'assurer au domicile du patient des soins médicaux et paramédicaux importants pour une durée limitée mais renouvelables en fonction de l'évolution de l'état de santé du patient. C'est « l'hôpital à la maison ». L'objectif d'un service de HAD est d'éviter voire de raccourcir une hospitalisation classique en établissement afin d'améliorer le confort des patients et de baisser les coûts de fonctionnement des hôpitaux.

L'organisme gestionnaire du SSIAD de Montluçon est le Centre Hospitalier de Montluçon qui gère également le service de HAD. Quel que soit le type de structures, un ensemble de personnes prises en charge doit recevoir des soins qui sont prodigués par un ensemble de ressources : médecins, infirmiers, aide-soignants, kinésithérapeutes, ... La problématique rencontrée par le centre hospitalier de Montluçon est l'organisation des activités de soins des ressources internes à l'hôpital. Lors de la thèse de Fabrice Gayraud ([GAYRAUD 2015](#)), nous nous sommes intéressés à cette problématique au travers de l'organisation des tournées des soignants dans un contexte de mutualisation des ressources entre les deux structures.

3.2.1 Contexte du maintien à domicile

Une « activité » est un soin ou un ensemble de soins réalisés au même moment par un ou plusieurs professionnels de santé au domicile d'un patient. Un patient est défini par son lieu de résidence, son niveau de dépendance (de 1 à 4 dans nos travaux) et une fenêtre de temps de disponibilité pour recevoir les soins. Cette fenêtre de temps est large dans le cas de la HAD car le patient est à son domicile 24h/24 mais elle peut être plus resserrée pour le SSIAD car le patient peut maintenir une certaine activité en dehors de son domicile. Une ressource est un professionnel appartenant à la structure de soins. Elle a un type (médecin, infirmier, aide-soignant, kinésithérapeute, ...) et un planning de travail. Le patient peut exprimer des préférences pour être soigné par une ressource plutôt qu'une autre.

Une spécificité du problème abordé concerne la nécessité d'avoir deux ressources présentes pour réaliser certaines activités. Par exemple, un patient à fort niveau de dépendance est plus difficile à manipuler pour les activités de soins et oblige la présence simultanée de deux soignants. Par conséquent, les tournées ne sont plus indépendantes les unes des autres et il faut envisager une synchronisation des tournées pour réaliser ces activités particulières. La figure 3.1 illustre cette synchronisation pour les patients *P2* et *P10*.

L'objectif est de répartir et ordonner les activités entre les différentes ressources afin de construire les tournées en s'attachant à :

- minimiser le temps de déplacement des ressources,
- répartir équitablement les patients de même niveau de dépendance entre les tournées,

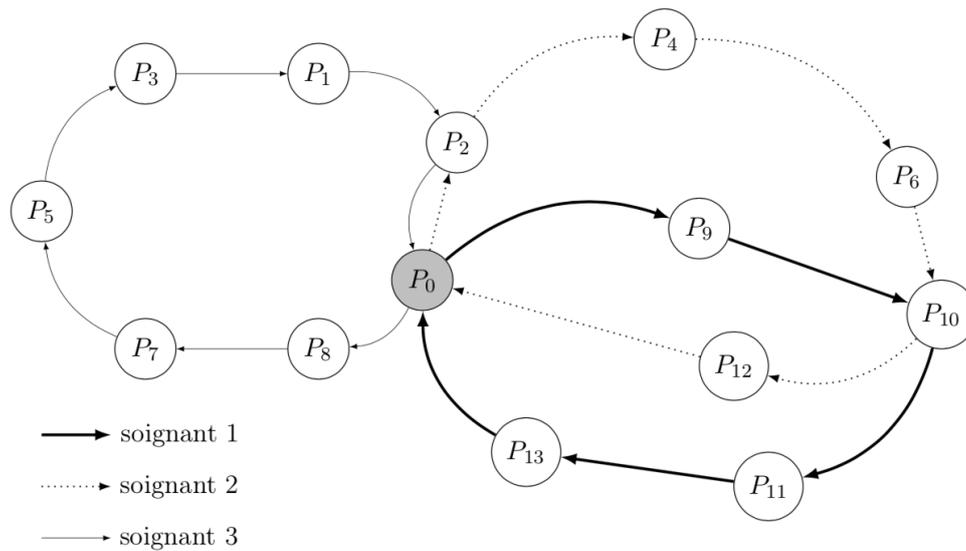


FIGURE 3.1 – Exemple de tournées avec 3 soignants et 13 patients

- maximiser la satisfaction des patients en leur affectant les ressources souhaitées tout en respectant les contraintes suivantes :
 - fenêtre de temps de disponibilités des patients,
 - planning de travail des ressources,
 - nombre et type de ressources nécessaires pour réaliser chaque activité.

3.2.2 Synchronized m-TSP with Time Windows

Le problème peut être modélisé par un m-TSPTW (multiple Traveling Salesman Problem with Time Windows) dans lequel il s'agit de répartir les N activités entre les M ressources et de construire les tournées des M ressources tout en respectant des contraintes temporelles liées aux fenêtres de temps.

Si on ajoute les contraintes de synchronisation, le problème devient un «synchronized m-TSP with Time Windows» que l'on trouve bien souvent sous l'appellation VRPTWSyn (VRP with time windows and synchronized visits) dans la littérature. Ce problème a été identifié et formalisé par (BREDSTRÖM et RÖNNQVIST 2008) dans un contexte de soins pour des personnes âgées.

Dans la littérature, le contexte de soins à domicile est le principal cadre d'application mais on rencontre également ce problème dans :

- l'exploitation forestière en suède (KARLSSON et al. 2004) dans laquelle il faut synchroniser l'intervention des différents types de véhicules (abatteuse, porteur),
- l'industrie pétrolière et gazière où il s'agit d'organiser le routage d'une flotte hétérogène de navires qui nécessitent l'action simultanée de plus de deux remorqueurs (CAVALCANTI et MENDES 2019),
- dans la construction préfabriquée (LI et al. 2020) dans lequel les véhicules transportant les matériaux doivent être présents sur certains chantiers de manière synchronisée.

On rencontre également des contraintes de synchronisation dans un problème de tournée sur arcs dans le cadre d'opérations de déneigement au Canada (SALAZAR-AGUILAR et al. 2012).

Les contraintes sont :

- C1 - circuits hamiltoniens** : toutes les activités doivent être réalisées une et une seule fois,
- C2 - fenêtres de temps des activités** : la date de début de chaque activité doit être dans la fenêtre de temps de l'activité,
- C3 - fenêtre de temps des ressources** : la tournée de chaque ressource se déroule pendant son planning de travail,
- C4 - synchronisation** : lorsqu'une activité nécessite plus d'une ressource, toutes les ressources nécessaires doivent être présentes au début de l'activité.

(BREDSTRÖM et RÖNNQVIST 2008) considère plusieurs objectifs :

- minimisation du temps total de trajet,
- maximisation de la satisfaction des patients,
- minimisation de la différence entre la durée de la plus longue tournée et la durée de la tournée de la plus courte, pour équilibrer les tournées.
- minimisation de la combinaison linéaire pondérée des 2 ou 3 critères ci-dessus.

Dans leurs travaux, la préférence d'un patient pour une ressource est exprimée par une valeur comprise entre -10 et 10; plus la valeur est proche -10, plus elle est préférée. Cependant, un seul type de ressource est considéré alors que dans nos travaux, plusieurs types de ressource doivent être pris en compte. Nous avons choisi de modéliser le type d'une ressource et la préférence du patient pour une ressource par un degré de compatibilité $C_{i,k}$ compris entre 0 et 1. Si le degré $C_{i,k}$ est égal à 0, la ressource k ne peut pas réaliser l'activité i , sinon elle le peut. Plus le degré de compatibilité est proche de 1, plus la préférence du patient de l'activité i pour la ressource k est importante.

Nous ajoutons donc une contrainte spécifique à notre problème :

- C5 - compatibilité entre ressources et activités** : seules les ressources compatibles avec une activité peuvent la réaliser.

Un programme linéaire en nombres entiers a été proposé (GAYRAUD, DEROUSSI et al. 2013), il permet de résoudre des instances comportant jusqu'à 30 activités. Nous nous sommes ensuite intéressés à la proposition de métaheuristiques selon deux approches : un couplage et une hybridation.

3.2.3 Couplage (métaheuristique \Leftrightarrow modèle de simulation)

Une première approche consiste à s'inspirer d'une représentation indirecte sous la forme d'un tour géant, représentation fréquemment rencontrée pour des problèmes de tournées de véhicules :

$$(\sigma = \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N)$$

où σ_i est l'activité placée à la position i du tour géant. N est le nombre d'activités. Cette représentation permet l'utilisation de systèmes de voisinage simples, nous avons opté pour l'insertion.

La construction d'une solution est réalisée au moyen d'un modèle de simulation à événements discrets avec une approche par événements. Il permet d'affecter, en appliquant une règle de gestion, les activités aux ressources compatibles en respectant le tour géant et de calculer les dates de début des activités et évaluer les critères de performance. Une activité peut débiter lorsque toutes les ressources nécessaires à sa réalisation sont disponibles. Deux règles de gestion ont été testées :

R1 : affecter l'activité à la ou les ressources compatibles qui minimisent la date de fin de l'activité.

R2 : affecter l'activité à la ou les ressources compatibles qui minimisent les distances parcourues.

Pour les deux règles, en cas d'égalité entre plusieurs ressources, la ressource qui a le degré de compatibilité le plus élevé avec l'activité à réaliser est privilégiée.

Cette approche n'a pas donné de résultats concluants. En effet, comme l'indiquent (ROUSSEAU et al. 2013), les contraintes de synchronisation rendent le problème assez difficile à résoudre avec les méthodes traditionnelles de recherche locale. En effet, le déplacement d'une activité synchronisée dans le tour géant peut avoir des conséquences sur d'autres activités et entraîner des retards. Nous avons donc rapidement opté pour une autre représentation incluant l'affectation des ressources aux activités.

3.2.4 Hybridation (métaheuristique ⇔ algorithme d'ordonnement de projet)

Cette approche est inspirée de nos travaux sur les problèmes d'ordonnement. On peut d'ailleurs noter que d'autres auteurs, au même moment, ont fait le lien entre le Synchronized m-TSPTW et le RCPSP avec 2 types de ressources : des ressources mobiles (les soignants) et des ressources fixes (les patients) pour proposer un programme linéaire mixte (MASMOUDI et MELLOULI 2014).

Représentation directe

Nous avons utilisé, dans (GAYRAUD, DEROUSSI et al. 2014), la même représentation que celle proposée pour le problème d'ordonnement d'activités de livraison-collecte présenté dans le chapitre 2, à savoir :

$$X = (\sigma_{(1)}, \sigma_{(2)}, \dots, \sigma_{(M)})$$

où $\sigma_{(k)}$ est la permutation des activités affectées à la ressource k , M est le nombre de ressources. Contrairement aux représentations proposées dans le chapitre 2, une activité peut être présente dans plusieurs listes, selon le nombre de ressources nécessaires pour la réaliser. Dans ce cas, les tournées des ressources doivent être synchronisées.

Un exemple de représentation d'une solution et sa traduction sous la forme d'un graphe sont donnés par la figure 3.2, l'activité α représente le départ du dépôt et l'activité β représente le retour au dépôt. Les ressources sont nommés R1, R2 et R3. Grâce à cette représentation, la vérification des contraintes de synchronisation consiste à s'assurer de l'absence de circuit. Une illustration d'une solution non réalisable est donnée par la figure 3.3.

Cependant, la représentation proposée peut ne pas respecter les contraintes de fenêtre de temps.

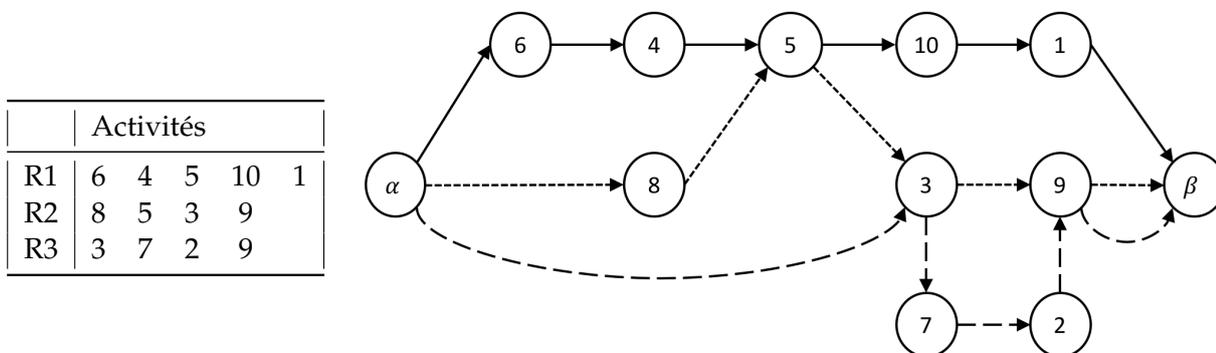


FIGURE 3.2 – Une solution réalisable et sa représentation graphique

Système de voisinage

Le système de voisinage utilisé est également identique à celui présenté dans le chapitre 2 à savoir :

- la satisfaction des patients mesurée par la somme des écarts entre le degré de compatibilité de la meilleure ressource pour réaliser l'activité (par définition : 1) et le degré de compatibilité de la ressource affectée,

$$H2(X) = \sum_{k=1}^M \sum_{i \in \sigma(k)} (1 - C_{i,k})$$

- l'équilibre entre les tournées mesuré par l'écart entre le plus haut et le plus bas niveau de dépendance des tournées. Le niveau de dépendance d'une tournée est la somme des niveaux de dépendance des patients de la tournée.

$$H3(X) = \max_{k=1,M} \left(\sum_{i \in \sigma(k)} n_i \right) - \min_{k=1,M} \left(\sum_{i \in \sigma(k)} n_i \right)$$

où n_i est le niveau de dépendance du patient de l'activité i .

Pour comparer nos résultats avec les résultats de la littérature (BREDSTRÖM et RÖNNQVIST 2008), le niveau de dépendance d'une tournée a été remplacée par sa durée. Le critère d'équilibre devient :

$$H3'(X) = \max_{k=1,M} (D_k) - \min_{k=1,M} (D_k)$$

où D_k est la durée de la tournée k .

auxquels nous avons ajouté des pénalités lorsque les dates de début des activités ne respectent pas les dates de début au plus tard :

$$pen(X) = \sum_{i=1}^N \max(T_i - l_i; 0)^2$$

où l_i est la date de fin au plus tard (incluant la durée de réalisation de l'activité) de l'activité i .

Ces 4 critères sont à minimiser et nous les avons considérés de manière hiérarchisée :

$$H(X) = \alpha_1 H1(X) + \alpha_2 H2(X) + \alpha_3 H3(X) + \alpha_4 pen(X)$$

Les coefficients sont choisis de telle sorte que les pénalités soient prioritaires par rapport aux autres critères pour permettre dans un premier temps la recherche d'une solution respectant les dates de début au plus tard.

3.2.5 Résultats

La représentation proposée a été mise en oeuvre dans une recherche locale itérée. Trois critères d'acceptation ont été comparés : Random Walk (RW), Better Walk (BW) et Metropolis Walk (MW). Dans un premiers temps, la métaheuristique a été testée sur des instances de la littérature (BREDSTRÖM et RÖNNQVIST 2008) pour un problème proche puis sur des instances adaptées pour correspondre au problème.

3.2.5.1 Instances de la littérature

Les instances de la littérature sont de trois tailles :

- cinq instances de petit taille (numérotées de 1 à 5) composées de 20 activités dont 2 synchronisées et 4 ressources ;
- trois instances de taille moyenne (numérotées de 6 à 8) composées de 50 activités dont 5 synchronisées et 10 ressources ;
- deux instances de grande taille (numérotées 9 et 10) composées de 80 activités dont 8 synchronisées et 16 ressources.

Chaque instance est déclinée en cinq variantes, chaque variante diffère par l'amplitude des fenêtres de temps :

- F (fixed) : la date de début de chaque activité est fixée, l'amplitude des fenêtres de temps est nulle,
- S (small) : l'amplitude moyenne des fenêtres de temps de début des activités varie entre 1,3 et 1,8 heures suivant les instances,
- M (medium) : l'amplitude moyenne des fenêtres de temps est comprise entre 2,1 et 2,9 heures suivant les instances,
- L (large) : l'amplitude moyenne des fenêtres de temps varie entre 2,9 et 3,9 heures suivant les instances,
- A (no restriction) : les dates de début des activités ne sont pas soumises à des contraintes de fenêtres de temps.

Les ressources sont d'un seul type. Le niveau de dépendance des patients n'est pas pris en compte, l'équilibre des tournées se fait selon la durée (critère $H3'(X)$) et non selon le niveau de dépendance. La préférence des patients étant exprimée par une valeur comprise entre -10 et 10, le calcul du critère de la satisfaction des patients ($H2(X)$) a été adapté.

Instances de petite taille - mono-objectif

Le tableau 3.1 présente une comparaison des résultats obtenus par (BREDSTRÖM et RÖNNQVIST 2008) avec une heuristique basée sur la résolution successive de programmes linéaires en nombres entiers relaxés (colonne Bred) et les meilleurs résultats obtenus par la Recherche Locale Itérée (colonne RLI) pour les 3 critères étudiés. Des solutions respectant les dates de début au plus tard ont été construites pour toutes les instances et tous les critères. Les valeurs en gras correspondent à une solution optimale (issues de (BREDSTRÖM et RÖNNQVIST 2008) et (AFIFI et al. 2016)).

Les fenêtres de temps d'amplitude nulle (F) contraignent plus le problème et donc favorisent la résolution des programmes linéaires. En revanche, dès que les fenêtres de temps ont des amplitudes strictement positives (S, M et L), la recherche locale itérée trouve une solution au moins aussi bonne que l'heuristique, aussi bien avec le critère d'acceptation BW que MW. RW est plus efficace que l'heuristique pour les instances M, L et A mais ne rivalise pas avec BW et MW. Pour les instances sans fenêtre de temps (A), la recherche locale itérée MW obtient les meilleurs résultats pour toutes les instances.

Pour les 25 instances et les 3 critères, nous avons proposé 27 nouvelles bornes supérieures. Pour le critère de l'équilibre qui semble être le critère le plus difficile, certains de nos résultats (8 instances sur 15) ont été améliorés après la thèse de Fabrice Gayraud par (AFIFI et al. 2016) avec un recuit simulé hybridé avec une recherche locale et (LIU et al. 2019) avec une méthode à grand voisinage adaptatif.

Instances de moyenne et grande taille - bi-objectif

Le tableau 3.2 donne une comparaison des résultats obtenus par l'heuristique proposée par (BREDSTRÖM et RÖNNQVIST 2008) et deux versions de la recherche locale itérée (l'une avec BW et l'autre avec MW) pour la minimisation de la combinaison linéaire de temps total et de l'équilibrage.

Toutes les répliques, aussi bien avec BW que MW, améliorent les résultats de la littérature aussi bien pour les valeurs minimales et maximales que la valeur moyenne.

3.2.5.2 Instances adaptées

Nous avons adapté les instances de la littérature en intégrant des types de ressources (2), en ajoutant des niveaux de dépendance et en augmentant la part d'activités synchronisées (20%). Nous

	Préférence ($H2(X)$)		Temps de déplacement total ($H1(X)$)		Equilibre ($H3'(X)$)	
	Bred	RLI	Bred	RLI	Bred	RLI
1 F	-96,45	-96,45	5,13	5,13	0,117	0,117
2 F	-85,26	-85,26	4,98	4,98	0,037	0,037
3 F	-56,7	-55,14	5,19	5,28	0,154	0,192
4 F	-63,08	-56,61	7,21	7,21	0,942	0,942
5 F	-62,59	-60,65	5,37	5,37	0,201	0,201
1 S	-114,03	-114,03	3,55	3,55	0,052	0,026
2 S	-92,09	-92,09	4,27	4,27	0,025	0,025
3 S	-99,49	-99,49	3,63	3,63	0,064	0,013
4 S	-99,43	-96,52	6,69	6,14	0,162	0,065
5 S	-76,29	-76,29	3,93	3,93	0,038	0,038
1 M	-117,8	-117,8	3,55	3,55	0,026	0,026
2 M	-102,63	-104,81	3,58	3,58	0,025	0,012
3 M	-106,59	-106,59	3,33	3,33	0,064	0,013
4 M	-105,42	-106,72	5,75	5,75	0,049	0,032
5 M	-76,29	-76,29	3,53	3,53	0,063	0,038
1 L	-118,51	-118,51	3,39	3,39	0,026	0
2 L	-106,06	-107,64	3,42	3,42	0,025	0,012
3 L	-104,72	-107,87	3,29	3,29	0,013	0,026
4 L	-96,96	-109,29	5,3	5,13	0,032	0,016
5 L	-84,21	-84,21	3,34	3,34	0,025	0,025
1 A	-116,37	-118,51	3,69	3,12	0,026	0
2 A	-117,24	-117,24	3,34	2,97	0,012	0,012
3 A	-92,22	-112,5	3,28	2,85	0,026	0,013
4 A	-92,78	-111,74	4,91	4,29	0,065	0,016
5 A	-43,74	-84,66	3,45	2,92	0,038	0,013

TABLE 3.1 – Instances de petite taille - monocritère

	Bred	RLI (BW)				RLI (MW)			
		min	moy	max	σ	min	moy	max	σ
6 S	13,69	11,14	11,73	12,15	0,42	11,85	12,29	12,69	0,31
7 S	15,06	11,83	11,99	12,37	0,2	11,71	12,11	12,51	0,29
8 S	-	11,46	12,11	12,57	0,39	11,84	12,38	12,92	0,36
9 S	-	14,85	15,33	15,8	0,3	15,18	15,79	16,38	0,4
10 S	16,24	12,42	13,5	13,66	0,41	12,76	13,3	13,67	0,33
6 M	12,8	10,38	10,62	10,94	0,18	10,82	11,21	11,53	0,23
7 M	13,45	10,1	10,5	11,09	0,38	10,2	10,74	11,26	0,4
8 M	-	10,24	10,68	11,28	0,36	10,4	10,84	11,32	0,38
9 M	-	13,69	14	14,34	0,28	13,83	14,34	14,62	0,27
10 M	15,33	11,61	11,89	12,22	0,23	11,63	12,12	12,68	0,34
6 L	11,87	9,76	10	10,17	0,15	9,72	10,36	10,6	0,33
7 L	11,52	9,73	9,92	10,41	0,25	9,61	10,1	10,37	0,27
8 L	15,16	9,67	9,94	10,06	0,14	10,31	10,41	10,53	0,08
9 L	20,68	13,13	13,37	13,6	0,17	13,25	13,57	13,71	0,16
10 L	17,61	11	11,49	11,71	0,25	11,46	11,54	11,71	0,09
6 A	11,88	8,33	8,65	8,97	0,21	8,88	9,29	9,51	0,21
7 A	12,4	7,97	8,48	8,83	0,31	8,63	8,95	9,24	0,24
8 A	13,01	8,41	8,7	9	0,21	8,7	8,94	9,08	0,14
9 A	22,89	11,16	11,46	11,67	0,17	11,53	12,07	12,38	0,3
10 A	17,59	9,81	10,14	10,41	0,21	9,84	10,33	10,72	0,28

TABLE 3.2 – Instances de taille moyenne

avons également énuméré toutes les possibilités de priorisation des 3 critères (H1, H2, H3) et testé les méthodes proposées avec toutes les possibilités.

Pour les instances de petite taille, la résolution avec le solveur Cplex a permis d'avoir une borne inférieure. Lorsque le critère de la dépendance (H3) est prioritaire, l'hybridation proposée obtient des résultats très proches de la borne inférieure.

Pour les instances de moyenne et grande taille, les critères d'acceptation BW et MW ont été comparés. De manière globale, les deux critères donnent des résultats assez proches. MW se détache légèrement avec 14 instances sur 24 pour lesquelles le critère obtient strictement les meilleurs résultats (contre 6 pour MW).

Nous regrettons que les expérimentations n'aient pas pu être réalisées sur des instances réelles.

3.3 Livraison urbaine avec drones et véhicules

Imaginé pendant la Première Guerre Mondiale, les drones (UAV - Unmanned Aerial Vehicles) sont des aéronefs sans pilote qui sont utilisés ou peuvent être utilisés dans un large éventail d'applications militaires et civiles. Les drones présentent un certain nombre d'avantages (SINGHAL et al. 2018) : réduction de la consommation d'énergie, diminution des risques pour la vie humaine, facilité de collecte des données, possibilité de vol stationnaire et très haute résolution spatiale. Mais de nombreux défis restent à relever (SHAKHATREH et al. 2019, OTTO et al. 2018) : poids de la charge à porter, autonomie de la batterie, sécurisation des déplacements dans l'espace aérien, comportement en essais, connectivité et traitement des informations.

(SINGHAL et al. 2018) ont identifié 3 grands domaines d'application des drones :

- militaire aussi bien en attaque qu'en défense : ISTAR (Intelligence, Surveillance, Target Acquisition, Reconnaissance), EA (Electronic Attack), SEAD (Suppression and/or destruction of Enemy Air Defense), CSAR (Combat Search and Rescue), mission de combat, relai de communication (UDEANU et al. 2016) .
- civile : cartographie, vidéo ou photographie professionnelle, opérations de recherche et de sauvetage, inspections de sécurité des bâtiments ou infrastructures, agriculture de précision, surveillance (faune, frontières), prévision du temps et livraison de marchandises.
- environnementale : surveillance (sol, cultures, eau), inspection des montagnes, surveillance de la qualité de l'air.

Dans la thèse de Raïssa Saleu (SALEU 2021), nous nous sommes intéressés au problème de livraison du dernier kilomètre impliquant des drones et des véhicules.

3.3.1 Intégration des drones dans la livraison du dernier kilomètre

La croissance de la livraison du dernier kilomètre et de la demande de service rapide pousse la logistique au-delà de la gestion traditionnelle des transports. Parmi les évolutions récentes, l'utilisation de drones est envisagée dans le processus de livraison offrant de nouvelles possibilités mais induisant également de nouveaux problèmes de routage complexes. La piste est aujourd'hui prise au sérieux par plusieurs entreprises à travers le monde telles que Amazon, UPS, Cdiscount, Alibaba et DHL qui ont lancé d'importants projets de recherche sur l'utilisation des drones pour livrer leurs produits à leurs clients.

Dans la littérature, les problèmes d'optimisation de tournées de livraison intégrant des drones sont généralement qualifiés de variantes des problèmes de voyageur de commerce et de tournées de véhicules (KHOUI et al. 2019). Ces problèmes considèrent un ensemble de clients, dont chacun doit être servi exactement une fois par un véhicule ou un drone. Dans certains problèmes, certains

clients ne sont pas éligibles à la livraison par drone, en raison de contraintes pratiques, telles que la charge utile ou la portée de vol limitées. L'objectif est de minimiser la durée d'achèvement de toutes les livraisons, c'est-à-dire l'heure à laquelle les véhicules et les drones sont de retour au dépôt, avec le service de tous les clients effectué.

Les problématiques sont très variées, les drones pouvant être utilisés de manière indépendante ou en conjonction avec d'autres robots ou moyens de transport comme des véhicules. Les drones peuvent être lancés et récupérés dans des installations fixes (par exemple, des centres de livraison ou des magasins de détail), à partir d'installations mobiles (par exemple, des plates-formes qui peuvent être déplacées à différents endroits), ou à partir des véhicules eux-mêmes. En fonction des rôles assignés aux drones et aux véhicules, 4 classes de problèmes d'optimisation peuvent être identifiées (figure 3.4) :

- (a) véhicules et drones travaillant de manière synchronisée** Au cours de son trajet, un véhicule peut lancer un drone pour livrer un client, le drone effectue la livraison et retourne au véhicule (qui s'est déplacé entre temps) pour prendre d'autres produits à livrer. Le rendez-vous entre le véhicule et le drone nécessite des mécanismes de coordination (synchronisation) en temps et en lieu. Ce problème a été identifié par (MURRAY et CHU 2015) sous le terme « Flying Sidekick Traveling Salesman Problem » (FSTSP).
- (b) véhicules et drones réalisant des opérations de manière indépendantes** Les drones et les véhicules travaillent en parallèle et effectuent des livraisons indépendantes sans besoin de synchronisation. Les drones font des allers-retours entre le dépôt et les clients qui leur sont affectés alors que les véhicules réalisent chacun une tournée passant par les clients qui leur sont affectés. Ce problème a été identifié par (MURRAY et CHU 2015) sous le terme « Parallel Drone Scheduling Traveling Salesman Problem » (PDSTSP).
- (c) véhicules supportant les opérations des drones** Les drones sont les seuls véhicules à atteindre les destinataires et les véhicules sont utilisés pour rapprocher les drones des clients ou comme station de recharge. Des rendez-vous entre les véhicules et les drones doivent être déterminés. Ce problème a été identifié par (MATHEW et al. 2015) sous le terme « Carrier-vehicle Problem with Drones » (CVP-D).
- (d) drones réalisant toutes les opérations** Les drones peuvent réaliser des tournées avec plusieurs clients, ont une capacité et un temps de fonctionnement maximal, ce qui fait du problème une généralisation du problème de tournées de véhicules. Ce problème peut sembler plus simple mais les caractéristiques des drones sont prises en compte de manière plus approfondie. Ce problème a été identifié par (DORLING et al. 2017) sous le terme « Drone Delivery Problem » (DDP).

Dans la classification de (MACRINA et al. 2020), le FSTSP et le PDSTSP sont regroupés dans la classe des « TSP with drones » (TSP-D) ou « VRP with drones » (VRP-D) selon le nombre de véhicules utilisés. Comme le montre le tableau 3.3 issu de l'état de l'art du même auteur, la littérature sur les problèmes de tournées impliquant des drones est très récente et de nombreuses pistes de recherche restent à explorer.

Problème	TSP-D	VRP-D	DDP	CVP-D
Nombre de publications	29	17	5	13
Date première publication	2015	2017	2017	2015

TABLE 3.3 – Quelques chiffres sur la littérature des problèmes de tournées impliquant des drones

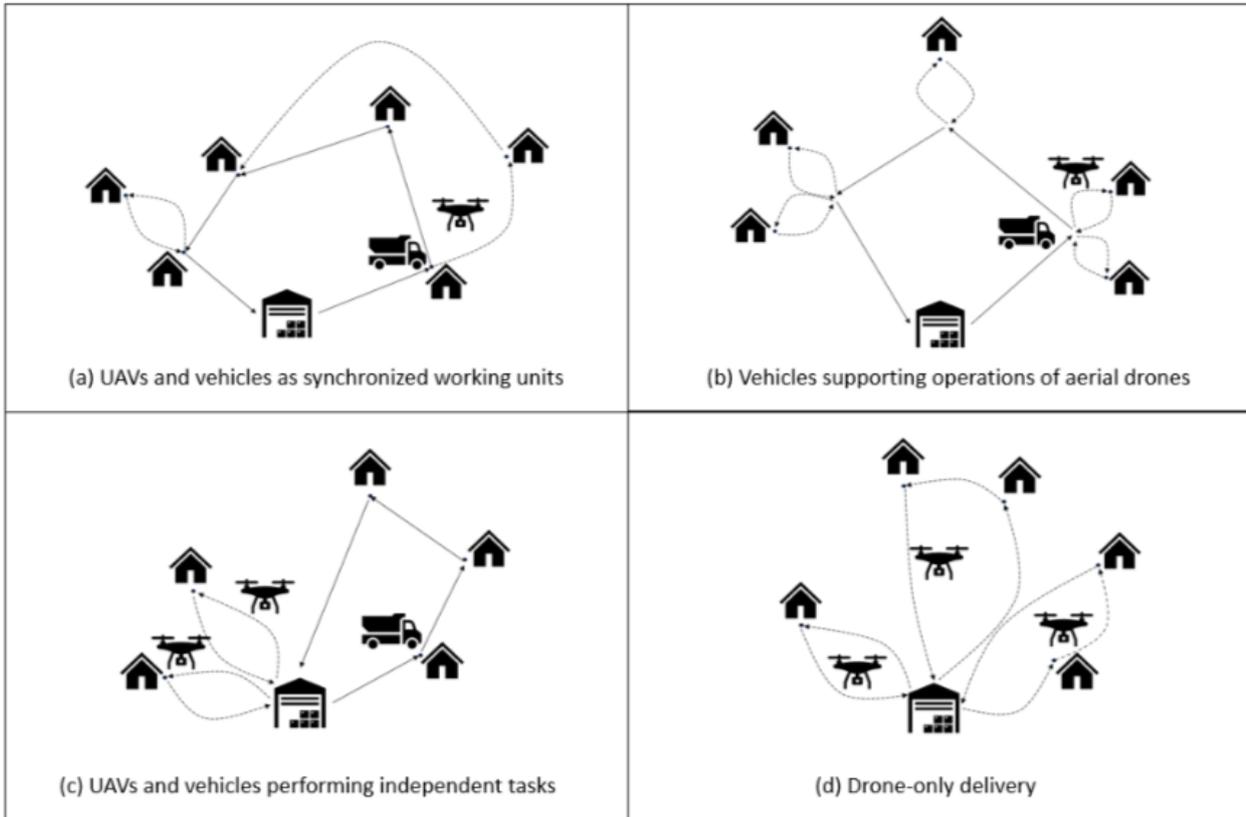


FIGURE 3.4 – Exemples des 4 modèles de livraisons utilisant des drones

3.3.2 Présentation du Parallel Drone Scheduling Traveling Salesman Problem

Dans le Parallel Drone Scheduling Traveling Salesman Problem (PDSTSP), un seul véhicule et une flotte de M drones sont disponibles pour livrer les colis à N clients. Chaque client est livré une et une seule fois. Le véhicule livre les clients selon une seule tournée partant du dépôt, visitant un sous-ensemble de clients, et revenant au dépôt. Les drones effectuent des allers-retours entre le dépôt et les clients qui ne sont pas livrés par le véhicule, livrant un seul client à chaque voyage. Tous les clients ne sont pas éligibles à la livraison par drone, en raison de contraintes pratiques, telles que la charge utile limitée ou la portée de vol des drones.

La figure 3.5 représente une solution du PDSTSP pour une instance avec 2 drones et 10 clients, dont 5 sont éligibles à la livraison par drone.

Soient :

- N , un ensemble de clients représentés chacun par un sommet,
- N_d , un sous-ensemble de clients éligibles à la livraison par drone,
- $d_{i,j}$, le temps nécessaire au véhicule pour réaliser le trajet entre le sommet i et le sommet j , $i \in N \cup \{0\}, j \in N \cup \{0\}$. Le sommet 0 représente le dépôt,
- \tilde{d}_i le temps nécessaire au drone pour réaliser l'aller-retour entre le dépôt et le sommet i , $i \in N_d$,

les contraintes du PDSTSP sont :

C1 - visite de tous les clients : tous les clients doivent être servis une et une seule fois,

C2 - éligibilité des clients : seuls les clients éligibles à la livraison par drone peuvent être livrés par un drone.

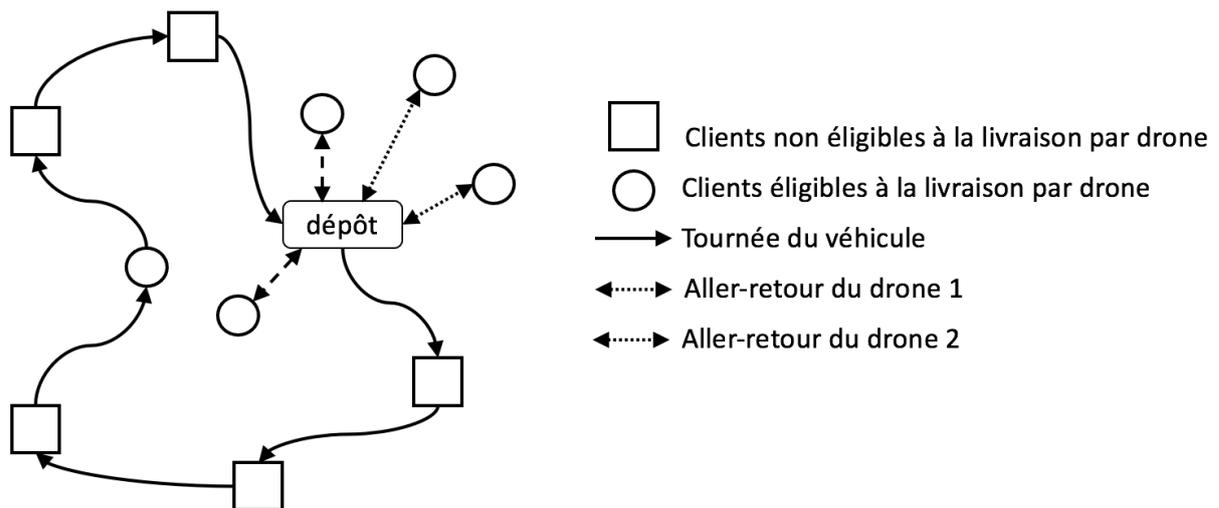


FIGURE 3.5 – Une solution du PDSTSP

En supposant que le véhicule et les drones peuvent partir du dépôt à la date 0, l'objectif du PDSTSP est de répartir les clients entre le véhicule et les drones de manière à minimiser la durée de livraison de tous les clients, c'est-à-dire la date à laquelle le véhicule et tous les drones sont de retour au dépôt, avec le service de tous les clients effectué. Mais d'autres objectifs plus réalistes peuvent être envisagés telle que la maximisation du taux de satisfaction des clients par rapport aux délais de livraison.

3.3.3 Hybridation (métaheuristique \Leftrightarrow programmation dynamique)

L'approche proposée dans (MBIADOU SALEU et al. 2018) s'inspire de l'approche Route First - Cluster Second proposée par (BEASLEY 1983) pour les problèmes de tournées de véhicules. Une solution est représentée sous la forme d'un tour géant de clients qui sera ensuite découpée en une permutation de clients affectés au véhicule et un ensemble de clients affectés aux drones.

Représentation indirecte

La représentation est un tour géant :

$$\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N)$$

où σ_i est le client placée à la position i du tour géant.

Cette représentation présente l'intérêt de ne devoir respecter aucune contrainte ce qui facilite la construction d'un tour géant initial (heuristique du plus proche voisin par exemple) ainsi que la définition d'un système de voisinage (insertion, 2-opt).

Construction d'une solution à l'aide de la programmation dynamique - $M = 1$ drone

L'algorithme de construction d'une solution repose sur la recherche d'un chemin dans un graphe auxiliaire orienté sans circuit $G = (S, A)$ dans lequel :

- l'ensemble des sommets $S = N \cup \{\sigma_0; \sigma_{N+1}\}$ est composé de l'ensemble des clients et de deux sommets représentant le dépôt (σ_0 pour le départ du dépôt, σ_{N+1} pour le retour),
- un arc (σ_i, σ_j) existe si et seulement si les conditions suivantes sont satisfaites :
 - $i < j$,
 - tous les clients $\sigma_{i+1}, \sigma_{i+2}, \dots, \sigma_{j-1}$ sont éligibles à la livraison par drone.

Un arc (σ_i, σ_j) signifie que les clients σ_i et σ_j sont desservis par le véhicule et les clients $\sigma_{i+1}, \sigma_{i+2}, \dots, \sigma_{j-1}$ par le drones.. A chaque arc (σ_i, σ_j) , est associé un vecteur coût $(c_{\sigma_i, \sigma_j}^1, c_{\sigma_i, \sigma_j}^2)$.

- c_{σ_i, σ_j}^1 représente le temps nécessaire au véhicule pour desservir le client σ_i puis le client σ_j .

$$c_{\sigma_i, \sigma_j}^1 = d_{\sigma_i, \sigma_j}$$

- c_{σ_i, σ_j}^2 représente le temps nécessaire au drone pour réaliser les aller-retours entre le dépôt et les clients $\sigma_{i+1}, \sigma_{i+2}, \dots, \sigma_{j-1}$.

$$c_{\sigma_i, \sigma_j}^2 = \sum_{i'=i+1}^{j-1} \widetilde{d}_{\sigma_{i'}}$$

La répartition des clients entre le véhicule et les drones revient à rechercher un plus court chemin bicritère entre les sommets σ_0 et σ_{N+1} .

La recherche du plus court chemin bi-critère utilise un algorithme de Bellman-Ford adapté grâce à :

- un label $L_a = (c_a^1, c_a^2)$ composé du temps nécessaire au véhicule (basé sur les $c_{i,j}^1$) et du temps nécessaire au drone (basé sur les $c_{i,j}^2$),
- une règle de dominance permettant de limiter le nombre de labels : le label $L_a = (c_a^1, c_a^2)$ domine le label $L_b = (c_b^1, c_b^2)$ si $(c_a^1 < c_b^1 \text{ et } c_a^2 \leq c_b^2)$ ou $(c_a^1 \leq c_b^1 \text{ et } c_a^2 < c_b^2)$.

Exemple 1. Graphe auxiliaire - $N = 5$

La figure 3.8 donne le graphe auxiliaire du tour géant $\sigma = (1, 2, 3, 4, 5)$ pour l'instance décrite par les figures 3.6 et 3.7. Les clients 3 et 5 ne sont pas éligibles à la livraison par drone. Nous pouvons noter que :

- les arcs $(0, 4)$, $(0, 5)$ et $(0, 6)$ n'existent pas car le client 3 n'est pas éligible à la livraison par drone,
- de même pour l'arc $(3, 6)$, qui n'existe pas car le client 5 n'est pas éligible,
- $c_{0,3}^1 = d_{0,3} = 11$ et $c_{0,3}^2 = \widetilde{d}_1 + \widetilde{d}_2 = 28$

$d_{i,j}$	0	1	2	3	4	5
0	0	8	9	11	6	8
1		0	10	7	10	12
2			0	13	8	6
3				0	11	7
4					0	5
5						0

FIGURE 3.6 – Temps de déplacement du véhicule entre le dépôt (0) et les clients

\widetilde{d}_i	1	2	4
	16	12	20

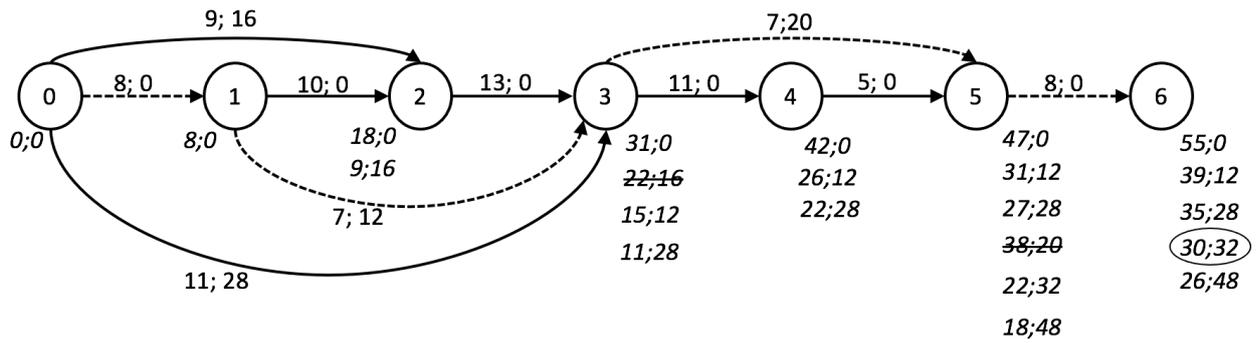
FIGURE 3.7 – Temps de déplacement aller-retour du drone entre le dépôt et les clients éligibles par drone

Le plus court chemin (en pointillés) passe par les sommets $(0, 1, 3, 5, 6)$, ce qui signifie que la tournée du véhicule dessert les clients 1, 3 puis 5 et le drone livre les clients 2 et 4.

Extension : $M > 1$ drones

Si un seul drone est considéré ($M = 1$), la répartition des clients entre le véhicule et le drone est optimale.

Lorsque $M > 1$, une première approche consiste à définir un label de taille $M + 1$, dans lequel le premier champ représente le temps nécessaire au véhicule et les M champs suivants représentent les temps nécessaires aux drones.

FIGURE 3.8 – Graphe auxiliaire correspondant au tour géant $\sigma = (1, 2, 3, 4, 5)$

Afin de ne pas alourdir l'algorithme de recherche du plus court chemin (multi-critère), nous avons choisi, en deuxième approche, de diviser le coût $c_{i,j}^2$ par M pour ramener le problème à un problème de plus court chemin bi-critère. Le problème de répartition des clients entre les drones est ensuite résolu de manière heuristique par analogie avec un problème d'ordonnancement à machines parallèles.

Extension : $K > 1$ véhicules et M drones

Pour le Parallel Drone Scheduling Multiple Traveling Salesman Problem (PDSMTSP) avec K véhicules et M drones, nous avons proposé (MBIADOU SALEU et al. 2022) un nouveau label, composé de 4 champs $(n_{veh}, c_{maxVeh}, c_{curVeh}, c_{drone})$.

La recherche du plus court chemin construit les tournées des véhicules les unes après les autres et deux règles d'extension de label sont mises en œuvre : la règle R1 consiste à poursuivre avec la tournée courante, la règle R2 clot la tournée courante pour en débiter une autre (si le nombre de véhicules utilisés le permet). Ainsi, dans le label, n_{veh} est le numéro du véhicule courant, c_{maxVeh} est le temps nécessaire pour réaliser la plus longue tournée, c_{curVeh} est le temps nécessaire pour la tournée courante et c_{drone} est le temps nécessaire aux drones.

Plusieurs bornes inférieures et supérieures ont été définies afin de limiter le nombre de labels générés.

3.3.4 Résultats

Pour le PDSTSP, deux séries d'expériences ont été menées. La première série concerne les instances de référence de (MURRAY et CHU 2015) qui étaient les seules instances existantes pour ce problème. Ces instances sont de petite taille (10 à 20 clients). Nous avons généré des instances de plus grande taille à partir de la TSPLIB sur lesquelles nous avons mené une deuxième série d'expériences.

Instances de petite taille

Dans les instances de (MURRAY et CHU 2015), les véhicules et les drones ont la même vitesse (25 miles/h) mais les distances ont été calculées avec une distance de Manhattan pour le véhicule et avec une distance euclidienne pour les drones. L'emplacement du dépôt a été choisi comme étant soit près du centre de tous les clients, soit près du bord de la région des clients, soit à l'origine (en bas à gauche). Les emplacements des clients ont été générés de manière à ce que 20%, 40%, 60% ou 80% des clients soient situés dans le rayon d'action du drone par rapport au dépôt, le drone ayant une endurance de vol de 30 minutes. Enfin, 10 à 20% des clients ont été arbitrairement définis comme non éligibles aux drones en raison du poids excessif des colis. Chacun des paramètres ci-dessus a été répété 10 fois, ce qui a donné lieu à 120 instances avec 10 clients et 120 instances avec

20 clients. Toutes ces instances ont été résolues avec un seul véhicule et 1, 2 ou 3 drones, ce qui a donné 720 instances de test.

Le tableau 3.4 donne une comparaison entre les résultats obtenus par les heuristiques itératives proposées par (MURRAY et CHU 2015) et notre hybridation. Les heuristiques reposent sur la décomposition du PDSTSP en deux problèmes : un TSP sur tous les clients non éligibles à la livraison par drone et un PMS (Parallel Machine Scheduling) pour tous les clients éligibles à la livraison par drone. Le TSP est résolu soit par la programmation linéaire (IP) soit par l'heuristique Savings et le PMS est résolu soit par la programmation linéaire soit par la règle LPT. Les clients sont ensuite déplacés via divers mouvements (échange ou déplacement) d'un mode de transport à l'autre.

Le tableau donne l'écart (Gap) moyen et maximal entre la solution obtenue et la solution optimale, obtenue par la résolution du programme linéaire ainsi que les temps de calcul et le nombre de solutions optimales obtenues. L'utilisation d'approches exactes pour résoudre les sous-problèmes TSP et PMS individuels ("IP/IP") donne de bons résultats mais dans des temps qui deviennent significativement plus longs pour les instances avec 20 clients. Notre matheuristique permet d'améliorer les résultats de (MURRAY et CHU 2015) dans des temps tout à fait raisonnables.

Méthode	10 clients					20 clients				
	Gap (%)		Runtime (s)		#sol	Gap (%)		Runtime (s)		#sol
	Avg	Max	Avg	Max		Avg	Max	Avg	Max	
(MURRAY et CHU 2015)										
IP / IP	0.12	10.13	2.4856	29.97	299	0.22	5.53	495.272	21510.61	302
IP / LPT	0.12	10.13	2.3093	28.85	300	0.31	18.00	498.057	21521.31	292
Savings / IP	1.57	20.68	0.2373	8.26	209	3.79	18.83	3.721	80.68	87
Savings / LPT	1.58	20.68	0.0003	0.01	209	3.90	18.83	0.008	0.07	80
(MBIADOU SALEU et al. 2018)										
Matheuristique	0.02	4.45	3.2060	3.26	313	0.15	23.47	3.072	3.32	337

TABLE 3.4 – Comparaison de notre approche avec les résultats obtenus par (MURRAY et CHU 2015)

Instances de grande taille

Pour évaluer notre matheuristique sur des instances plus grandes, nous avons généré un ensemble d'instances en utilisant les instances *att48.tsp*, *berlin52.tsp*, *eil101.tsp*, *gr120.tsp*, *pr152.tsp* et *gr229.tsp* de la TSPLIB. Le numéro dans le nom du fichier correspond au nombre de clients. Pour rester cohérent avec les instances de (MURRAY et CHU 2015), nous avons utilisé la distance de Manhattan pour le trajet en véhicule et la distance euclidienne pour le trajet en drone. A partir de chaque fichier, nous avons généré ce que nous appelons une instance de référence et plusieurs instances qui peuvent être dérivées de cette instance de référence en changeant certains paramètres. Ces instances sont caractérisées par :

- la position du dépôt : au centre des clients ou en bas à gauche,
- le pourcentage de clients éligibles à la livraison par drone : 0%, 20%, 40%, 60%, 80% ou 100%,
- la vitesse des drones : même vitesse que le véhicule ou 2, 3, 4, ou 5 fois plus rapide que le véhicule,
- le nombre de drones : 1, 2, 3, 4 ou 5 drones.

Une analyse de sensibilité a été menée sur l'impact de la position du dépôt, du pourcentage de clients éligibles à la livraison par drone, de la vitesse du drone et du nombre de drones. Ces instances ont ensuite été utilisées comme instance de référence dans de nombreuses publications (DELL'AMICO et al. 2020, DINH et al. 2021, LEI et CHEN 2022, NGUYEN et al. 2022,

MONTEMANNI et DELL'AMICO 2023). En particulier, (MONTEMANNI et DELL'AMICO 2023) a traité le problème avec la programmation par contrainte et a obtenu une solution optimale pour chaque instance (avec 32h de calcul pour certaines instances). Le tableau 3.5 donne l'écart (Gap) moyen et maximal entre la solution obtenue (en 5 minutes maximum) et la solution optimale, obtenue par (MONTEMANNI et DELL'AMICO 2023) ainsi que le nombre de solutions optimales obtenues.

	Gap (%)		
	Avg	Max	#sol
att48	0,00	0,00	15
berlin52	0,01	0,17	14
eil101	0,10	0,53	9
gr120	0,11	0,36	7
pr152	0,18	0,79	6
gr229	0,70	1,71	0

TABLE 3.5 – Comparaison de notre approche avec les solutions optimales obtenues par (MONTEMANNI et DELL'AMICO 2023)

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté nos travaux sur deux extensions du problème du voyageur de commerce multiple.

La première extension intègre principalement la notion de synchronisation entre deux tournées dans un contexte de mutualisation de ressources pour du maintien à domicile. La meilleure approche est basée sur une représentation de solutions intégrant les aspects séquençement et affectation. L'utilisation des graphes permet d'identifier les représentations non réalisables et de calculer les critères de performance.

Ces travaux orientés vers une mutualisation des ressources étaient en quelque sorte précurseurs puisque depuis le 1er juin 2018, les services de soins infirmiers et d'hospitalisation à domicile peuvent intervenir ensemble auprès d'un même patient. Ainsi, un patient recevant des soins réalisés par l'équipe d'un SSIAD (ou d'aide et de soins à domicile - SPASAD) et dont l'état de santé nécessite une hospitalisation à domicile (HAD) peut bénéficier de cette prise en charge et continuer à être soigné par une partie des professionnels du SSIAD qu'il connaît déjà.

La seconde extension considère deux types de ressources dans un contexte de livraison urbaine : un ou plusieurs véhicules réalisant des circuits à partir du dépôt et un ou plusieurs drones réalisant des allers-retours avec le dépôt. L'approche proposée s'inspire de l'approche Route First - Cluster Second. La principale contribution repose sur la modélisation du problème de répartition entre les véhicules et les drones sous la forme d'un problème multi-critères de recherche d'un chemin dans un graphe.

Depuis la thèse de Raïssa, de nombreux travaux prenant en compte les drones ont été publiés. La logistique du dernier kilomètre prend de l'importance principalement en lien avec les préoccupations environnementales actuelles. Des nouveaux modes de livraison apparaissent (incluant la mutualisation, la collaboration) induisant de nouveaux problèmes d'optimisations. Même si de nombreux freins subsistent (en particulier en terme de réglementation), la technologie des drones évolue rapidement et pourrait modifier considérablement le paysage commercial dans les années à venir.

Références

- DANTZIG, G. B. et J. H. RAMSER (1959). « The Truck Dispatching Problem ». In : *Management Science* 6.1, p. 80-91.
- CLARKE, G. et J. WRIGHT (1964). « Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points ». In : *Operations Research* 12.4, p. 568-582.
- BEASLEY, J. (1983). « Route first—Cluster second methods for vehicle routing ». In : *Omega* 11.4, p. 403-408.
- KARLSSON, J., M. RÖNNQVIST et J. BERGSTRÖM (2004). « An optimization model for annual harvest planning ». In : *Canadian Journal of Forest Research* 34.8, p. 1747-1754.
- BREDSTRÖM, D. et M. RÖNNQVIST (2008). « Combined vehicle routing and scheduling with temporal precedence and synchronization constraints ». In : *European Journal of Operational Research* 191.1, p. 19-31.
- SALAZAR-AGUILAR, M. A., A. LANGEVIN et G. LAPORTE (2012). « Synchronized arc routing for snow plowing operations ». In : *Computers & Operations Research* 39.7, p. 1432-1440.
- GAYRAUD, F., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2013). « A New Mathematical Formulation For The Home Health Care Problem ». In : *HCist 2013, Conference on Health and Social Care Information Systems and Technologies, Lisbon, Portugal*. Octobre 2013.
- ROUSSEAU, L.-M., M. GENDREAU et G. PESANT (2013). « The Synchronized Dynamic Vehicle Dispatching Problem ». In : *INFOR : Information Systems and Operational Research* 51.2, p. 76-83.
- GAYRAUD, F., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2014). « Problème de tournées de véhicules avec synchronisation pour l'organisation de soins à domicile ». In : *MOSIM 2014 (Modélisation et Simulation)*. Nancy. 5-7 novembre 2014.
- MASMOUDI, M. et R. MELLOULI (déc. 2014). « MILP for synchronized-mTSPTW : Application to home healthcare scheduling ». In : *International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. IEEE, p. 297-302.
- GAYRAUD, F. (2015). « Problème de tournées de véhicules avec contraintes de synchronisation dans le cadre de structures de maintien à domicile ». Thèse de doct. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
- MATHEW, N., S. L. SMITH et S. L. WASLANDER (2015). « Planning Paths for Package Delivery in Heterogeneous Multirobot Teams ». In : *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 12.4, p. 1298-1308.
- MURRAY, C. C. et A. G. CHU (2015). « The flying sidekick traveling salesman problem : Optimization of drone-assisted parcel delivery ». In : *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 54, p. 86-109.
- AFIFI, S., D.-C. DANG et A. MOUKRIM (2016). « Heuristic solutions for the vehicle routing problem with time windows and synchronized visits ». In : *Optimization Letters* 10.3, p. 511-525.
- PELLETIER, S., O. JABALI et G. LAPORTE (fév. 2016). « 50th Anniversary Invited Article—Goods Distribution with Electric Vehicles : Review and Research Perspectives ». In : *Transportation Science* 50, p. 3-22.
- UDEANU, G., A. DOBRESCU et M. OLTEAN (juin 2016). « Unmanned aerial vehicle in military operations ». In : *Scientific Research and Education in the Air Force* 18, p. 199-206.
- DORLING, K., J. HEINRICHS, G. G. MESSIER et S. MAGIEROWSKI (2017). « Vehicle Routing Problems for Drone Delivery ». In : *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics : Systems* 47.1, p. 70-85.
- MBIADOU SALEU, R., L. DEROUSSI, D. FEILLET, N. GRANGEON et A. QUILLIOT (2018). « An iterative two-step heuristic for the Parallel Drone Scheduling Traveling Salesman Problem ». In : *Networks* 72.4, p. 459-474.
- OTTO, A., N. AGATZ, J. CAMPBELL, B. GOLDEN et E. PESCH (2018). « Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones : A survey ». In : *Networks* 72.4, p. 411-458.

- SINGHAL, G., B. BANSOD et L. MATHEW (2018). « Unmanned Aerial Vehicle Classification, Applications and Challenges : A Review. » In : *Preprints 2018, 2018110601*.
- CAVALCANTI, L. B. et A. B. MENDES (2019). « A Greedy Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows, Synchronization Constraints and Heterogeneous Fleet ». In : *Computational Logistics. ICCL 2019. Lecture Notes in Computer Science*. Sous la dir. de P.-A. C. et V. S. T. 11756.
- KHOUI, I., A. LAOUI et C. ADJIH (2019). « A Survey of Recent Extended Variants of the Traveling Salesman and Vehicle Routing Problems for Unmanned Aerial Vehicles ». In : *Drones* 3.3.
- LIU, R., Y. TAO et X. XIE (2019). « An adaptive large neighborhood search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and synchronized visits ». In : *Computers & Operations Research* 101, p. 250-262.
- SHAKHATREH, H., A. H. SAWALMEH, A. AL-FUQAHA, Z. DOU, E. ALMAITA, I. KHALIL, N. S. OTHMAN, A. KHREISHAH et M. GUIZANI (2019). « Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) : A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges ». In : *IEEE Access* 7, p. 48572-48634.
- DELL'AMICO, M., R. MONTEMANNI et S. NOVELLANI (2020). « Matheuristic algorithms for the parallel drone scheduling traveling salesman problem ». In : *Annals of Operations Research* 289.2, p. 211-226.
- LI, J.-q., Y.-q. HAN, P.-y. DUAN, Y.-y. HAN, B. NIU, C.-d. LI, Z.-x. ZHENG et Y.-p. LIU (2020). « Metaheuristic algorithm for solving vehicle routing problems with time windows and synchronized visit constraints in prefabricated systems ». In : *Journal of Cleaner Production* 250.119464.
- MACRINA, G., L. DI PUGLIA PUGLIESE, F. GUERRIERO et G. LAPORTE (2020). « Drone-aided routing : A literature review ». In : *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 120.102762.
- CHEIKHROUHO, O. et I. KHOUI (2021). « A comprehensive survey on the Multiple Traveling Salesman Problem : Applications, approaches and taxonomy ». In : *Computer Science Review* 40, p. 100369.
- DINH, Q., D. DO et M. HÀ (2021). « Ants can solve the parallel drone scheduling traveling salesman problem ». In : *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO), Lille, France, 10-14 July 2021*, p. 14-21.
- SALEU, R. M. (2021). « Optimization of urban deliveries with drones and vehicles in parallel ». Thèse de doct. Université Clermont Auvergne.
- LEI, D. et X. CHEN (2022). « An improved variable neighborhood search for parallel drone scheduling traveling salesman problem ». In : *Applied Soft Computing* 127.109416.
- MBIADOU SALEU, R., L. DEROUSI, D. FEILLET, N. GRANGEON et A. QUILLIOT (2022). « The Parallel Drone Scheduling Problem with Multiple Drones and Vehicles ». In : *European Journal of Operational Research* 300.2, p. 571-589.
- NGUYEN, M. A., G. T.-H. DANG, M. H. HÀ et M.-T. PHAM (2022). « The min-cost parallel drone scheduling vehicle routing problem ». In : *European Journal of Operational Research* 299.3, p. 910-930.
- MONTEMANNI, R. et M. DELL'AMICO (2023). « Solving the Parallel Drone Scheduling Traveling Salesman Problem via Constraint Programming ». In : *Algorithms* 16.1.

Chapitre 4

Equilibrage et rééquilibrage de lignes d'assemblage

Sommaire

4.1	Introduction	109
4.2	Simple Assembly Line Balancing Problem	111
4.2.1	Présentation du SALBP-1	112
4.2.2	Hybridation (métaheuristique \rightleftharpoons heuristique)	113
4.2.3	Résultats	116
4.3	Parallel Assembly Lines Balancing Problem	117
4.3.1	Présentation du PALBP	117
4.3.2	Atelier composé de deux lignes	118
4.3.3	Atelier composé de $L > 2$ lignes et affectation des types de produits aux lignes connue	119
4.4	Transfert Line Balancing Problem	120
4.4.1	Présentation du TLBP	120
4.4.2	Approche intégrée	122
4.4.3	Approche BF-SL : Hybridation (métaheuristique \rightleftharpoons programmation dynamique)	123
4.4.4	Approche SF-BL - Hybridation (métaheuristique \rightleftharpoons programmation dynamique)	124
4.4.5	Résultats	127
4.5	Problématique industrielle	128
4.5.1	Présentation de la ligne et des contraintes industrielles	128
4.5.2	Le problème de rééquilibrage	130
4.5.3	Heuristiques pour le rééquilibrage	131
4.5.4	Placement des mobiliers en bord de ligne	131
4.6	Conclusion	132
	Références	133

4.1 Introduction

A la fin du XIX^{ème} siècle, Frederick Taylor a mis au point une méthode de rationalisation de la production afin d'augmenter les cadences et la productivité. Il propose ainsi une organisation du travail reposant sur une division technique du travail par opérations (et par postes) par opposition à une organisation sociale du travail (par métiers). Chaque opération est disséquée et reconstruite de la manière la plus efficace possible - "*the one best way*". Cette nouvelle organisation du travail est la base du taylorisme (MOUSLI 2006).

Au début du XX^{ème} siècle, Henry Ford s'est appuyé sur les travaux de Taylor pour développer le principe de production à la chaîne que l'on retrouvera dans les chaînes des usines de montage d'automobiles. Selon ce principe, ce ne sont plus les ouvriers qui se déplacent, mais les pièces (ou produits) elles-mêmes. Cela permet de réduire les temps d'inactivité, les temps morts et d'augmenter la cadence qui est donc imposée aux ouvriers. Cette forme efficace mais particulièrement déshumanisante d'organisation est illustrée par Chaplin dans *Les temps modernes*.

Cinquante ans plus tard, le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage a été identifié par (SALVESON 1955) comme un problème d'optimisation. En 1986, (BAYBARS 1986) a défini le problème d'équilibrage de ligne d'assemblage de base, nommé Simple Assembly Line Balancing Problem (SALBP). Ce problème a été démontré comme étant NP-difficile par (WEE et MAGAZINE 1986). Depuis, le SALBP a été abondamment étudié et a fait l'objet d'un grand nombre de publications. De nombreuses extensions ont été proposées et étudiées. Un site Internet est dédié au sujet et propose des bibliothèques d'instances - <https://assembly-line-balancing.de/>.

D'une manière générale, une ligne d'assemblage est composée d'un ensemble de stations (de travail) placées le long d'un convoyeur ou un équipement de manutention. Chaque station réalise un ensemble d'opérations nécessaires à l'assemblage d'un produit. Le produit assemblé se déplace de station en station à vitesse constante et est présent dans chaque station pendant une durée identique pour toutes les stations. Dans le SALBP, la structure de la ligne d'assemblage est une structure en série sur laquelle les stations sont placées côte à côte (*Basic straight lines*).

Cependant, les lignes de montage évoluant, différentes structures de ligne sont apparues au fil des années. Par exemple, nous pouvons citer :

- *Straight lines with multiple workplaces* : chaque station est composée d'un ensemble de machines travaillant en parallèle ou en série sur le produit,
- *Two-sided lines* : les stations sont placées des deux côtés de la ligne ce qui permet de réaliser différentes opérations simultanément sur les deux côtés du produit assemblé,
- *U-shaped lines* : les stations sont positionnées selon un U. Une station peut intervenir sur les deux branches du U en même temps, elle peut donc être amenée à opérer sur deux produits distincts à deux stades de production différents durant un temps de cycle donné,
- *Lines with a circular transfer* : les stations sont positionnées autour d'un plateau rotatif utilisé pour le chargement/déchargement du produit et son transfert d'une station à une autre.

Selon la variété des produits traités et leur répartition dans le temps, la littérature distingue les trois modèles suivants, représentés par la figure 4.1 :

- *single-model* : utilisé pour la production de masse d'un seul type de produit,
- *mixed-model* : utilisé pour produire différentes variantes d'un produit de base ne nécessitant pas de temps de setup,
- *multi-model* : utilisé pour la production de plusieurs types de produits en lot nécessitant des temps de setup entre les lots.

De nombreuses classifications sur les problèmes d'équilibrage de ligne existent. Parmi les plus connues, nous pouvons citer :

- (BECKER et SCHOLL 2006) qui s'intéressent aux problèmes qui généralisent ou relâchent certaines hypothèses du SALBP. Ces problèmes sont appelés Generalized Assembly Line Balancing Problems (GALBP). Cette classe de problèmes est très large et contient des extensions qui peuvent être intéressantes dans la pratique, incluant la sélection d'équipement, les contraintes d'affectation, ...
- (BOYSEN et al. 2007) qui proposent la première classification sous la forme d'une notation basée sur celle de (GRAHAM et al. 1979),

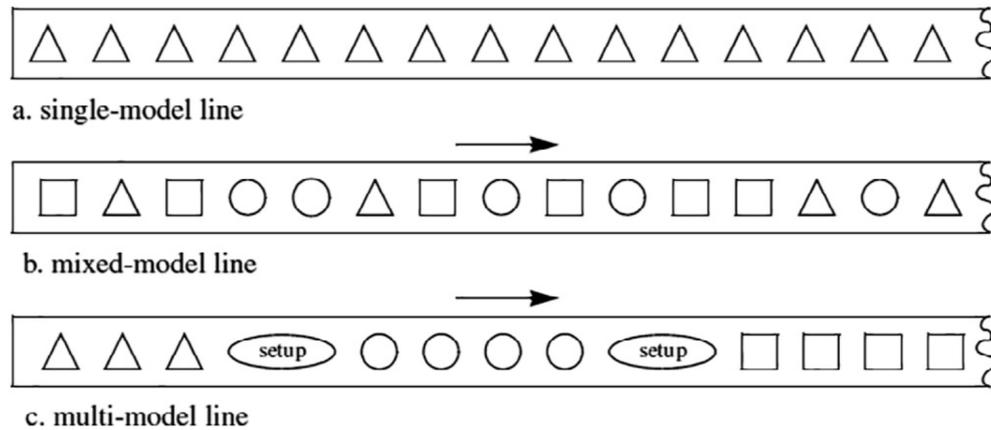


FIGURE 4.1 – les 3 modèles distinguées dans la littérature (BECKER et SCHOLL 2006)

- (BATAÏA et DOLGUI 2013) qui s’intéressent au contexte industriel des lignes d’assemblage tel que des contraintes d’inclusion/exclusion, la robotisation, le désassemblage,
- (HAZIR et DOLGUI 2019) qui s’intéressent à la construction d’équilibrage robuste en présence d’incertitude sur les données,
- (AGUILAR et al. 2020) qui présentent une revue des problèmes et de la littérature pour les systèmes composés de plusieurs lignes.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à 4 problèmes d’équilibrage de ligne d’assemblage.

- Le premier problème considéré est le **Simple Assembly Line Balancing Problem** (SALBP) pour lequel nous avons proposé une metaheuristique hybride exploitant le lien entre le SALBP et le problème du Bin-Packing. Ces travaux font suite à la thèse de Corinne Boutevin (BOUDEVIN 2003).
- Le second problème est le **Parallel Assembly Lines Balancing Problem** (PALBP) qui s’intéresse à l’assemblage de plusieurs types de produits grâce à des lignes parallèles. Nous montrons que les travaux pour le SALBP peuvent aisément être étendus à ce problème.
- Le troisième problème est le **Transfert Line Balancing Problem** (TLBP) qui intègre des contraintes industrielles telles que des temps de montage dépendant de la séquence, des contraintes d’inclusion, d’exclusion et d’accessibilité. Deux approches et donc deux metaheuristiques hybrides sont proposées. L’intérêt de ces 2 approches est qu’elles intègrent toutes les deux un algorithme optimal. Une des deux approches est étendue au Robotic Assembly Line Balancing Problem (RALBP). Ces travaux ont été réalisés pendant la thèse de Youssef Lahrichi (LAHRICHI 2021).
- Le dernier problème étudié est un problème de **Rééquilibrage** d’une ligne d’assemblage de véhicules intégrant de nombreuses contraintes industrielles. Plusieurs heuristiques permettent d’adapter un équilibrage existant à l’arrivée d’une nouvelle séquence de véhicules à produire. Ces travaux ont été réalisés pendant le stage de Master Recherche de Patrice Leclair et son post-doctorat (Patrice a réalisé une thèse sur des problèmes de routage en conditions réelles de trafic).

4.2 Simple Assembly Line Balancing Problem

Les hypothèses de base du SALBP sont les suivantes (BAYBARS 1986) :

- la ligne est en série,
- le système est dédié à un seul type de produit,

- les opérations sont reliées par des contraintes de précédence,
- une opération est réalisée par une unique station,
- il n'y a pas de restriction d'affectation en dehors de celles imposées par les contraintes de précédence : une station peut réaliser n'importe quelle opération,
- le temps d'exécution d'une opération ne dépend pas de la station à laquelle elle est affectée,
- les temps de cycle sont identiques pour toutes les stations,
- les durées d'exécution des opérations sont déterministes.

Suivant l'objectif considéré, quatre sortes de problème peuvent être définis selon que le nombre de stations et/ou le temps de cycle sont fixés ou non :

SALBP-F : le temps de cycle et le nombre de stations sont fixés. L'objectif est de construire une solution réalisable.

SALBP-1 : le temps de cycle est fixé. L'objectif est de minimiser le nombre de stations. Ce problème est considéré dans cette partie.

SALBP-2 : le nombre de stations est fixé. L'objectif est de minimiser le temps de cycle.

SALBP-E : le temps de cycle et le nombre de stations ne sont pas fixés. L'objectif est de minimiser le temps de cycle et le nombre de stations dans le but de maximiser l'efficacité de la ligne.

4.2.1 Présentation du SALBP-1

Soient :

- \mathcal{O} , un ensemble de N opérations,
- \mathcal{P} , un ensemble de contraintes de précédence, P_i est l'ensemble des opérations qui doivent précéder l'opération i ,
- \mathcal{S} , un ensemble de M stations ($M \leq N$),
- C , un temps de cycle,
- d_i , la durée de l'opération $i, i = 1, N$,

le problème consiste à déterminer l'affectation des opérations aux stations tout en respectant les 2 contraintes suivantes :

C1 - contrainte de précédence : si l'opération i doit précéder l'opération j alors :

- soit les opérations i et j sont affectées à la même station,
- soit l'opération i est affectée à une station qui précède, dans la ligne, la station affectée à l'opération j .

C2 - contrainte de temps de cycle : la somme de la durée des opérations affectées à une station doit être inférieure au temps de cycle.

L'objectif est la minimisation du nombre de stations utilisées - une station est utilisée lorsqu'au moins une opération lui est affectée.

Exemple 1. Le tableau 4.1 et la figure 4.2 décrivent l'instance "Mansoor" avec 11 opérations.

Opération	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Durée	4	38	45	12	10	8	12	10	2	10	34

TABLE 4.1 – Durée des 11 opérations - Instance "Mansoor"

Si $C = 62$, une solution optimale est composée de 3 stations. Celle-ci est représentée par le tableau 4.2. Pour chaque station, nous donnons la liste des opérations affectées ainsi que la charge définie par la somme des durées des opérations affectées.

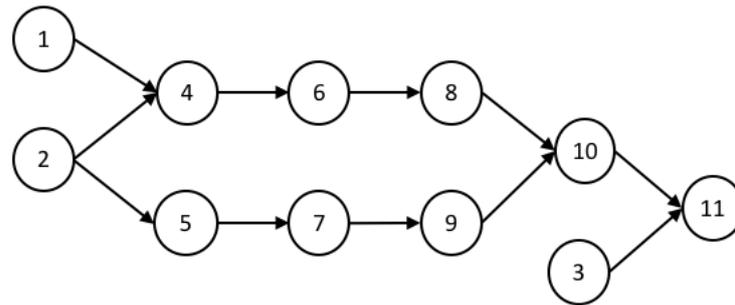


FIGURE 4.2 – Graphe de précedence - Instance "Mansoor"

Station	1	2	3
Opérations	2, 5, 7, 9	1, 3, 4	6, 8, 10, 11
Charge	62	61	62

TABLE 4.2 – Une solution optimale

4.2.2 Hybridation (métaheuristique \Leftrightarrow heuristique)

Une première approche, proposée par (BOUDEVIN et al. 2003) considère une représentation directe d'une solution de la manière suivante :

$$X = (a^1, a^2, \dots, a^N)$$

où a^i est le numéro de la station affectée à l'opération i . Le système de voisinage consiste à modifier aléatoirement le numéro de la station affectée à une opération choisie aléatoirement. Les résultats obtenus par cette approche avec un recuit simulé et un ILS (Improved Solution Kangaroo Algorithm - ISKA - à l'époque) ont donné de bons résultats pour l'application industrielle considérée (BOUDEVIN et al. 2003) mais de moins bons résultats pour les instances de la littérature. Cela peut s'expliquer par le fait que lorsqu'une station est chargée à 95%, il peut s'avérer difficile de trouver les 5% restant en utilisant le système de voisinage qui a été défini. Deux pistes d'amélioration pouvaient alors être envisagées : concevoir un système de voisinage plus performant ou changer d'approche. C'est cette dernière qui a retenu notre attention.

Parallèle entre le SALPB-1 et le problème du bin-packing 1D

Cette seconde approche est basée sur le parallèle entre le SALPB-1 et le problème du bin-packing 1D auquel se sont intéressés différents auteurs tels que (WEE et MAGAZINE 1986) et (FALKENAUER et DELCHAMBRE 1992). Ceux-ci ont montré que le problème d'équilibrage de type SALBP-1 peut facilement être ramené à un problème de bin-packing 1D si les contraintes de précedence sont omises. Ce parallèle est donné par le tableau 4.3. Les objets correspondent aux opérations et les boîtes aux stations. La répartition des objets dans les boîtes est similaire à l'affectation des opérations aux stations. Dans le problème du bin-packing 1D, la somme de la taille des objets placés dans une boîte ne doit pas être supérieure à la taille de la boîte. Dans le SALBP-1, la somme des durées des opérations affectées à une station doit être inférieure ou égale au temps de cycle.

Il existe un grand nombre de méthodes, dans la littérature, qui permettent de proposer rapidement une solution au problème du bin-packing 1D. Nous nous sommes intéressés aux heuristiques Next-Fit, First-Fit et Best-Fit qui ont une garantie de performance (COFFMAN et al. 1996) et sont simples et rapides d'exécution.

Elément du SALBP-1	Elément du bin-packing 1D
Station	Boîte
Opération	Objet
Temps de cycle	Taille des boîtes
Durée d'un opération	Taille d'un objet
Minimiser le nombre de stations utilisées	Minimiser le nombre de boîtes utilisées

TABLE 4.3 – Lien entre le SALBP-1 et le bin-packing

Représentation d'une solution

L'efficacité de ces heuristiques repose sur une séquence d'objets en entrée : l'application de l'heuristique sur deux séquences différentes peut conduire à des solutions complètement différentes en terme de constitution des boîtes et de nombre de boîtes utilisées. La représentation d'une solution proposée dans (GOURGAND et al. 2007) repose sur cette constatation et consiste en une séquence géante d'opérations.

$$\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N)$$

où σ_i est l'opération affectée à la $i^{\text{ème}}$ position de la séquence. Cette séquence doit respecter les contraintes de précédence. Une séquence géante initiale évidente consiste à ordonner les opérations selon les niveaux.

Construction d'une solution à l'aide d'une heuristique

La procédure de construction d'une solution σ consiste à adapter le principe des heuristiques Next-Fit, First-Fit et Best-Fit. Cette adaptation utilise la notion de compatibilité entre une opération et une station afin de respecter les contraintes C1 et C2 du SALBP-1.

Définition 1. [Opération compatible avec une station] Une opération i est dite compatible avec une station s si les contraintes de précédence et les contraintes de temps de cycle sont vérifiées :

- toutes les opérations $j \in P_i$ sont affectées à une station s' telle que $s' \leq s$,
- la charge courante de la station k est inférieure ou égale à $C - d_i$.

Dans la procédure de construction d'une solution, les opérations sont considérées dans l'ordre donné par la séquence σ et l'opération courante σ_i est ajoutée à la station s selon une des trois règles suivantes (issues des heuristiques pour le bin-packing 1D) :

- règle issue de Next-Fit : si l'opération σ_i est compatible avec la station courante s , alors affecter l'opération σ_i à la station courante s , sinon créer une nouvelle station s' qui devient la nouvelle station courante et lui affecter l'opération σ_i .
- règle issue de First-Fit : affecter l'opération σ_i à la première station avec laquelle elle est compatible (dans l'ordre de la ligne). Si une telle station n'existe pas, créer une nouvelle station s' et lui affecter l'opération σ_i .
- règle issue de Best-fit : affecter l'opération σ_i à la station, avec laquelle elle est compatible, la plus chargée. Si une telle station n'existe pas, créer une nouvelle station s' et lui affecter l'opération σ_i .

La procédure proposée repose sur les mêmes principes que les procédures basées sur des priorités de (SCHOLL et VOSS 1996). La règle issue de Next-Fit correspond à la stratégie «orientée station» de (TALBOT et al. 1986). Les règles issues de First-Fit et de Best-Fit correspondent à la stratégie «orientée opération» de (HACKMAN et al. 1989).

L'application de la procédure de construction d'une solution permet non seulement de construire un équilibrage X mais également de calculer des indicateurs tels que :

- $m(X)$: le nombre de stations utilisées dans l'équilibrage X ,
- $Ch_k(X)$: la charge de la station k , $k = 1, m(X)$, dans l'équilibrage X .

Système de voisinage

Pour la représentation σ proposée, un système de voisinage classique, nommé **Insertion1** consiste à choisir aléatoirement une opération σ_i et à l'insérer à une autre position dans la séquence σ . La nouvelle position doit être choisie aléatoirement parmi les positions qui respectent les contraintes de précédence, c'est à dire après le dernier des prédécesseurs et avant le premier des successeurs de l'opération σ_i dans σ . Cependant, ce système de voisinage peut construire des séquences qui conduisent aux mêmes équilibrages.

Un second système de voisinage, qui permettrait de limiter le nombre de solutions identiques, consiste à ne pas déplacer une opération dans la même station. Ceci est facilement envisageable dans le cas de la règle issue de Next Fit en exploitant la solution construite : la nouvelle position d'une opération dépend alors de la position des prédécesseurs et des successeurs de l'opération et des positions des opérations qui sont affectées à la même station que l'opération. La nouvelle position est choisie de telle sorte que l'opération sera affectée à une autre station. Ce second système de voisinage est nommé **Insertion2**.

Critères d'acceptation

Le critère du SALBP-1 est le nombre de stations utilisées. Cependant, il s'avère qu'un grand nombre d'équilibrages peut utiliser le même nombre de stations et la metaheuristique peut rester longtemps dans un plateau. C'est pourquoi nous avons proposé d'utiliser un critère plus précis. Par précis, nous voulons dire un critère qui permettra de détecter des solutions prometteuses c'est à dire des solutions dans lesquelles la charge des stations n'est pas homogène (FALKENAUER et DELCHAMBRE 1992). Il sera ainsi plus facile de vider une station peu chargée pour remplir une station plus chargée et ainsi diminuer le nombre de stations utilisées.

Les critères de performance suivants ont été définis :

- rapport entre la charge de la station la plus chargée et la charge de la station la moins chargée :

$$H_1(X) = \max_{k=1, m(X)} \{Ch_k(X)\} / \min_{k=1, m(X)} \{Ch_k(X)\}$$

- critère proposé par (FALKENAUER et DELCHAMBRE 1992) pour le problème du bin-packing :

$$H_2(X) = \frac{1}{m(X)} \sum_{k=1}^{m(X)} \left(\frac{Ch_k(X)}{C} \right)^2$$

Les critères H_1 et H_2 sont à maximiser.

Nous avons défini trois possibilités de critère d'acceptation pour dire que l'équilibrage X est considéré comme étant meilleur que l'équilibrage X' :

Versión 1 $m(X') \leq m(X)$

Versión 2 $m(X') < m(X)$ or $(m(X') = m(X) \text{ and } H_1(X') \geq H_1(X))$

Versión 3 $H_2(X') \geq H_2(X)$

4.2.3 Résultats

La représentation proposée ainsi que la procédure de construction d'une solution ont été utilisées pour hybrider la descente stochastique (SD), l'algorithme du Kangourou (KA) et ISKA. Chaque hybridation a été exécutée 10 fois avec 1.000.000 itérations et 20.000 itérations sans amélioration avant le saut pour KA et ISKA. Différents scénarios - correspondant aux différentes combinaisons des règles de construction, systèmes de voisinage, critères d'acceptation - ont été testés sur les 269 jeux d'essais SALBP de Scholl issus de la littérature <https://assembly-line-balancing.de/salbp/benchmark-data-sets-1993/>.

Dans un premier temps, nous avons comparé nos résultats avec ceux de (CHIANG 1998) qui ont appliqué une méthode tabou à 64 instances parmi les 269 instances. Nos métaheuristiques se sont montrées toutes très performantes lorsqu'elles sont hybridées avec la règle de construction issue de l'heuristique Best-Fit et quelle que soit la version pour le critère d'acceptation puisqu'elles ont obtenu 100% d'optimalité pour toutes les instances et toutes les exécutions. Le meilleur paramétrage proposé par (CHIANG 1998) obtient 96,9% d'optimalité.

Pour les 269 instances, les meilleurs résultats ont été obtenus avec l'algorithme du Kangourou et ISKA hybridés, avec le système de voisinage Insertion2 et la version 3 du critère d'acceptation. Tous les scénarios ont été comparés avec ceux de (SCHOLL et VOSS 1996), étendus dans (SCHOLL 1999) qui proposent également un couplage entre des méthodes tabou hybridées avec une méthode d'énumération tronquée, notées PrioTabu et EurTabu. Le tableau 4.4 présente une synthèse de nos résultats comparés également avec les résultats obtenus avec des branch and bound (SCHOLL et KLEIN 1999) et les résultats obtenus par Corine Boutevin pendant sa thèse avec un recuit simulé.

Si on considère le nombre de solutions optimales obtenues, nous pouvons constater dans un premier temps que l'objectif d'améliorer l'approche proposée par (BOUDEVIN 2003) a été atteint puisque le nombre de solutions optimales est largement supérieur et dans un second temps que nos résultats sont meilleurs que ceux de la littérature de l'époque. Seule la méthode SALOME obtient globalement le même nombre de solutions.

Cependant, si on considère l'écart relatif de nos solutions avec les solutions optimales, la valeur moyenne est supérieure à celle des autres méthodes pour la règle de construction basée sur l'heuristique Next-Fit. La valeur de 33,33% est due à l'instance Mitchell avec C=35.

Méthode	FABLE	(SCHOLL et KLEIN 1999)			(SCHOLL 1999)	
		OptPack	Eureka	SALOME	PrioTabu	EurTabu
# Opt.	179	172	194	224	200	214
Av. rel (%)	0,95	0,60	0,72	0,46	0,86	0,63
Max. rel (%)	7,69	7,69	12,00	7,69	7,69	7,69
Méthode	(GOURGAND et al. 2007)				(BOUDEVIN 2003)	
	KA+Next Fit	ISKA+Next Fit	KA+Best Fit	ISKA+Best Fit	SA	
# Opt.	225	225	221	224	175	
Av. rel (%)	0,9	0,94	0,77	0,67	0,61	
Max. rel (%)	33,33	33,33	14,29	14,29		

TABLE 4.4 – Comparaison avec les résultats obtenus par (SCHOLL 1999) (269 instances)

Opt. : nombre de solutions optimales obtenues

Av. rel (%) : écart relatif moyen

Max. rel (%) : écart relatif maximum

Les travaux de (SEWELL et JACOBSON 2012) ont permis de résoudre optimalement les 269 instances, en un temps très court (moins d'une seconde) à l'aide d'un algorithme appelé «Branch, Bound and Remember (BBR)». Celui-ci a été ensuite appliqué aux instances de (OTTO et al. 2013). L'algorithme BBR a résolu toutes les instances de petite et moyenne taille non résolues et plus de 90% des instances de grande taille (MORRISON et al. 2014).

Plus récemment, l'algorithme BBR a été étendu au cas d'une ligne de désassemblage (LI et al. 2019).

4.3 Parallel Assembly Lines Balancing Problem

Satisfaits des résultats obtenus pour le SALBP-1, nous avons poursuivi nos travaux sur l'étude du Parallel Assembly Lines Balancing Problem (PALBP) défini en 2006 par (GÖKÇEN et al. 2006) de la manière suivante :

- plusieurs lignes d'assemblage sont placées l'une à côté de l'autre, en parallèle,
- les lignes d'assemblage ont les mêmes caractéristiques : temps de cycle et nombre maximum de stations,
- chaque ligne d'assemblage est dédiée à la production d'un type de produit,
- les opérations d'un type de produit sont liées par des contraintes de précédence,
- une opération est réalisée par un opérateur mais un opérateur peut réaliser plusieurs opérations,
- pendant le temps de cycle, un opérateur travaille soit sur une seule ligne, soit sur deux lignes adjacentes (au même numéro de station).
- à un instant donné, un opérateur réalise une seule opération.

Le problème consiste à affecter chaque type de produit à une ligne et à équilibrer chaque ligne de manière à minimiser le nombre d'opérateurs - le temps de cycle est fixé.

Dans la littérature, la plupart des problèmes d'équilibrage de lignes provient de l'industrie automobile et traite de lignes d'assemblage de véhicules. Le PALBP considère des lignes d'assemblage de produits de petite taille tels les produits électroniques, les téléphones portables, ...

Les travaux présentés ici sont une extension des travaux sur le SALBP-1 au PALBP.

4.3.1 Présentation du PALBP

Le PALBP considère qu'un opérateur peut être partagé entre deux lignes adjacentes, ce qui signifie qu'un opérateur travaille sur deux stations voisines pendant un même cycle, en partageant son temps entre les opérations affectées à la station s de la ligne k et celles affectées à la station s de la ligne voisine.

Nous avons donc trois types de stations :

Station normale : l'opérateur réalise, pendant le temps de cycle, les opérations d'une seule ligne,

Station partagée : l'opérateur réalise, pendant le temps de cycle, les opérations de deux lignes adjacentes,

Station inutilisée : aucune opération n'est réalisée.

Le fait d'affecter un opérateur à deux lignes adjacentes permet de réduire le temps libre et donc de diminuer le nombre d'opérateurs.

La figure 4.3, issue de (SCHOLL et BOYSEN 2008), présente un exemple d'atelier composé de 4 lignes d'assemblage. Les lignes sont découpées en 5 stations. Le nombre de stations utilisées est

de 17. Sans l'utilisation d'opérateurs partagés, le nombre d'opérateurs serait de 17, alors que la figure montre seulement 13 opérateurs.

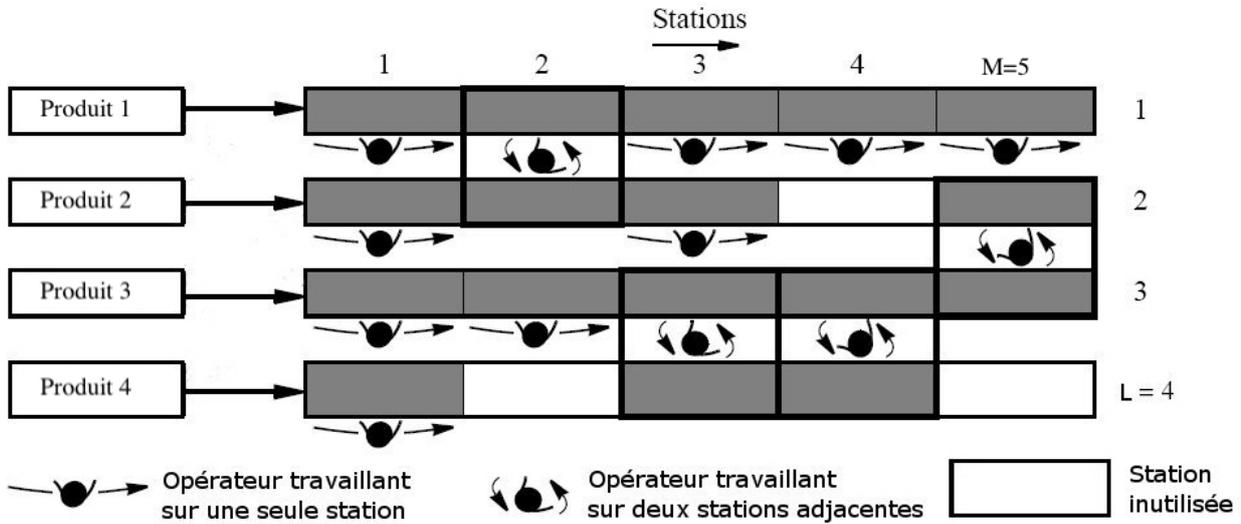


FIGURE 4.3 – Exemple de quatre lignes parallèles (SCHOLL et BOYSEN 2008)

Soit L , le nombre de lignes d'assemblage et donc de types de produit, les contraintes de précedence et de temps de cycle sont les mêmes que pour le SALBP-1. Le tableau 4.5 dresse une comparaison entre le SALBP-1 et le PALBP.

	SALBP-1	PALBP
# ligne d'assemblage	1	L
# type de produit	1	L
# station	M	$M \forall$ ligne
temps de cycle	C	C
affectation des opérateurs	1 station	1 ou 2 stations adjacentes
minimiser	le nombre de stations utilisées	le nombre d'opérateurs utilisés

TABLE 4.5 – Comparaison SALBP-1 et PBALBP

Il nous est apparu intéressant de distinguer trois cas :

- cas 1 atelier composé de deux lignes,
- cas 2 atelier composé de $L > 2$ lignes et affectation des types de produits aux lignes connue,
- cas 3 atelier composé de $L > 2$ lignes et affectation des types de produits aux lignes à déterminer.

4.3.2 Atelier composé de deux lignes

L'atelier est composé de deux lignes d'assemblage et chaque ligne traite un type de produits. Nous avons deux graphes de précedence. Comme l'indiquent (SCHOLL et BOYSEN 2008), ce problème peut être modélisé par un SALBP-1 avec un graphe de précedence \mathcal{P}' composé des deux graphes de précedence reliés entre eux par une opération fictive de début de durée 0.

Les méthodes proposées dans (GOURGAND et al. 2007) pour le SALBP-1 peuvent être appliquées directement de la manière suivante (GRANGEON et NORRE 2012). Une solution est représentée par une séquence σ d'opérations respectant le graphe \mathcal{P}' . Une solution est construite à l'aide d'une des règles issues des heuristiques pour le bin-packing 1D pour déterminer l'affectation des opérations

aux stations. A partir de la liste des opérations affectées à une station, le type de station peut être facilement déduit :

- si la liste des opérations affectées à une station concerne un seul type de produit, alors la station est normale,
- si la liste des opérations affectées à une station concerne plusieurs types de produit, alors la station est partagée,
- si aucune opération n'est affectée à une station, la station est inutilisée.

Les expérimentations ont été menées sur les instances construites par (GÖKÇEN et al. 2006) à partir des instances pour le SALBP-1. Les résultats obtenus par ILS sur les instances de petite et moyenne taille (jusqu'à 136 opérations) se sont montrés de même qualité que ceux de la littérature (branch and bound de (SCHOLL et BOYSEN 2009)). Concernant les instances de grande taille (146 à 218 opérations), nous avons amélioré les résultats de la littérature avec 9 nouvelles solutions optimales atteintes et une nouvelle borne supérieure.

4.3.3 Atelier composé de $L > 2$ lignes et affectation des types de produits aux lignes connue

L'atelier est composé de $L > 2$ lignes d'assemblage et chaque ligne traite un type de produits. Nous avons $L > 2$ graphes de précédence. Comme l'indique (SCHOLL et BOYSEN 2008), ce problème peut être modélisé par un ARALBP-1 (Assignment Restrictions Assembly Line Balancing Problem), extension du SALBP-1 avec un graphe de précédence \mathcal{P}' composé des L graphes de précédence reliés entre eux par une opération fictive de début de durée 0 et des contraintes d'affectation.

Les contraintes d'affectation peuvent s'exprimer de la manière suivante :

C3 - contrainte d'affectation : les opérations affectées à une station doivent être réalisées soit sur la même ligne (station normale) soit sur au plus deux lignes adjacentes (station partagée).

Les méthodes proposées dans (GOURGAND et al. 2007) peuvent être appliquées à condition d'adapter les règles de construction pour prendre en compte ces contraintes. Pour cela, nous avons étendu la notion de compatibilité entre une opération et une station.

Définition 1. [Opération compatible avec une station] Une opération i est dite compatible avec une station s si les contraintes de précédence et les contraintes de temps de cycle sont vérifiées et une des conditions suivantes est vérifiée :

- si s est une station normale,
 - l'opération i concerne le produit affecté à la ligne de la station s ,
 - l'opération i concerne un produit affecté à une ligne adjacente à la ligne de la station s .
- si s est une station partagée, l'opération i concerne un produit affecté à une des deux lignes de la station s
- la station s est une station inutilisée : aucune opération ne lui est affectée.

Les règles de construction définies précédemment peuvent s'utiliser grâce à cette définition. Pendant la construction d'une solution, une station normale peut devenir une station partagée en affectant une opération i qui concerne un produit affecté à une ligne adjacente à la station normale. De même, une station inutilisée peut devenir une station normale.

Cette adaptation a été présentée dans (GRANGEON et NORRE 2012). En l'absence d'instances dans la littérature, nous avons construit des instances basées sur les instances existantes. Les résultats ont montré l'efficacité de ILS et sa robustesse.

A notre connaissance, ce problème tel qu'il a été traité, n'a ensuite pas fait l'objet d'autres publications. Cependant, les travaux se sont poursuivis sur le Parallel Assembly Line Balancing Problem avec d'autres hypothèses telles que des temps de cycle différents entre les lignes ou d'autres critères de performance (AGUILAR et al. 2020).

4.4 Transfert Line Balancing Problem

Plus récemment, l'automatisation des lignes de production a vu l'émergence d'une nouvelle catégorie de lignes de production : celle des lignes de transfert, mentionnées pour la première fois dans (DOLGUI, GUSCHINSKI et al. 1999) puis dans (DOLGUI, GUSCHINSKY et al. 2000). Les lignes de transfert sont similaires aux lignes d'assemblage mais intègrent d'autres caractéristiques que celles définies par (SALVESON 1955) :

- une automatisation complète de la ligne de production à l'aide de machines à commandes numériques qui peuvent être équipées de plusieurs têtes d'usinage,
- la possibilité de réaliser des opérations symétriques en parallèle (et non seulement en séquentiel) afin de permettre une symétrie dans l'usinage et respecter des seuils de tolérance.

Dans la littérature, différentes contraintes additionnelles sont prises en compte dans le cadre de l'équilibrage des lignes de transfert :

- certaines opérations doivent être réalisées dans le même bloc (c'est-à-dire en parallèle) ou par la même station (c'est-à-dire en séquentiel),
- certaines opérations ne peuvent pas être réalisées dans le même bloc ou par la même station,
- plusieurs machines peuvent équiper une station. Pendant un temps de cycle, plusieurs pièces sont présentes dans la station mais une seule pièce par temps de cycle sort de la station pour passer dans la station suivante. Cette possibilité permet de prendre en compte des opérations dont la durée est plus grande que le temps de cycle.
- une opération ne peut pas être affectée à n'importe quelle station et une station ne peut pas réaliser toutes les opérations,
- des temps de montage dépendant de la séquence sont à appliquer entre deux opérations consécutives dans une même station,
- une opération peut être réalisée pour un ensemble de positions (ou rotations) de la pièce.

Dans la thèse de Youssef Lahrichi, nous nous sommes intéressés au Transfer Line Balancing Problem (TLBP) défini par (ESSAFI, DELORME et DOLGUI 2010) et (BORISOVSKY et al. 2013).

4.4.1 Présentation du TLBP

Aux notations définies pour le SALBP-1, s'ajoutent :

- K_{max} , le nombre maximum de machines par station,
- M_{max} , le nombre maximum de stations dans la ligne,
- N_{max} , le nombre maximum d'opérations qui peuvent être réalisées par une station,
- $t_{i,j}$, le temps de montage entre la fin de l'opération i et le début de l'opération j ,
- \mathcal{I} , un ensemble de couples d'opérations qui doivent être réalisées par la même station,
- \mathcal{E} , un ensemble de sous-ensembles d'opérations qui ne doivent pas être réalisées par la même station,
- Pos_i , l'ensemble des positions accessibles pour l'opération i .

Le problème d'équilibrage consiste à déterminer l'affectation des opérations aux stations tout en respectant les contraintes suivantes :

- C1 - contrainte de précédence** : contrainte identique à celle du SALBP-1.
- C2 - contrainte de temps de cycle** : contrainte similaire à celle du SALBP-1. La somme des durées des opérations affectées à une station additionnée des temps de montage doit être inférieure au temps de cycle multiplié par le nombre de machines affectées à la station.
- C3 - nombre maximum de machines par station** : au plus K_{max} machines peuvent être affectées à une station.
- C4 - nombre maximum de stations dans la ligne** : au plus M_{max} stations peuvent être utilisées.
- C5 - nombre maximum d'opération par station** : au plus N_{max} opérations peuvent être affectées à une station.
- C6 - contrainte d'inclusion** : si le couple d'opérations (i, j) appartient à \mathcal{I} alors les opérations i et j doivent être affectées à la même station
- C7 - contrainte d'exclusion** : toutes les opérations du sous-ensemble $e \in \mathcal{E}$ ne peuvent pas être affectées à la même station, mais n'importe quel sous-ensemble de e peut être affecté à la même station.
- C8 - contrainte d'accessibilité** : toutes les opérations affectées à une même station doivent avoir au moins une position commune.

L'objectif est la minimisation du nombre de machines utilisées. La contrainte de temps de cycle ayant un impact non négligeable sur le nombre de machines utilisées, il convient également de s'intéresser au séquençement des opérations au sein de chaque station en complément de leur affectation

Exemple 2. Soient :

$$\begin{aligned}
 N &= 7 & C &= 2,5 & K_{max} &= 3 & M_{max} &= 6 & N_{max} &= 3 \\
 \mathcal{I} &= \{(1,2)\} & \mathcal{E} &= \{(5,6)\} \\
 Pos_1 &= \{1,2\} & Pos_2 &= \{2,3\} & Pos_3 &= Pos_4 = Pos_5 &= \{1,2,3\} & Pos_6 &= \{1,3\} & Pos_7 &= \{2,3\}
 \end{aligned}$$

La figure 4.4 décrit les contraintes de précédence liant les 7 opérations. Les tableaux 4.5 et 4.6 donnent les durées des opérations et les temps de montage entre les opérations.

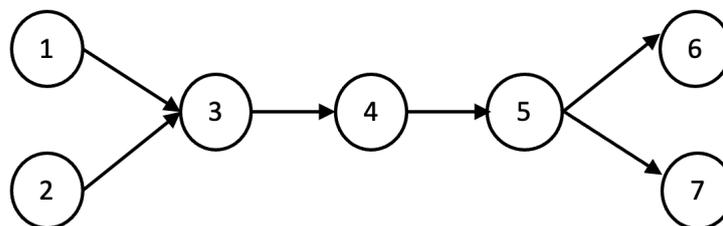


FIGURE 4.4 – Graphe de précédence

Le tableau 4.6 donne une solution avec 8 machines.

La contrainte d'inclusion impose que les opérations 1 et 2 soient affectées à la même station, ici la station 1. La seule position commune pour ces deux opérations est la position 2. La charge de la station 1 est : $d_1 + t_{1,2} + d_2 + t_{2,1}$. Comme la charge est supérieure au temps de cycle, une seconde machine est ajoutée à la station. Au début du temps de cycle, un premier produit est placé dans une machine de la première station. Au temps de cycle suivant, un second produit est placé dans la seconde machine de la première station. Au

Opération	1	2	3	4	5	6	7
Durée	1,5	1	3,5	1,5	2,5	3	1

FIGURE 4.5 – Durée des opérations

$t_{i,j}$	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0,5	1	1	1	1	1
2	1	0	0,5	1	1	1	1
3	0,5	1	0	1	1	1	1
4	1	1	1	0	0,5	1	1
5	1	1	1	0,5	0	0,5	1
6	1	1	1	1	1	0	0,5
7	1	1	1	1	1	0,5	0

FIGURE 4.6 – Temps de montage entre les opérations

Station	1	2	3	4	5	6
Séquence d'opérations	1; 2	3	4	5	6; 7	-
Charge	4	3,5	1,5	2,5	5	0
# machine	2	2	1	1	2	0
Position	2	1	1	1	3	-

TABLE 4.6 – Une solution

temps de cycle suivant, le premier produit sort de la première station pour entrer dans la seconde station et un troisième produit prend sa place dans la première station.

Pour résoudre ce problème d'affectation et de séquençement d'opérations, trois types d'approches ont été envisagées :

- une approche intégrée dans laquelle le problème est résolu de manière globale.
- une approche séquentielle de type Balance-First Sequence-Last (BF-SL) dans laquelle les opérations sont d'abord affectées aux opérations puis séquençées de manière optimale pour chaque station.
- une approche séquentielle de type Sequence-First Balance-Last (SF-BL) dans laquelle une séquence géante d'opérations est découpée en sous-séquences d'opérations qui sont affectées à chaque station.

Ces deux dernières approches ont conduit à la proposition d'hybridations de métaheuristique avec un algorithme de programmation dynamique.

4.4.2 Approche intégrée

Le problème a été modélisé sous la forme d'un programme linéaire en nombres entiers (LAHRICHI, GRANGEON et al. 2021b). Ce modèle comporte trois ensembles de variables pour l'affectation des opérations aux stations, 2 ensembles de variables pour le séquençement des opérations dans une station et un ensemble de variables pour la position choisie pour chaque station et 15 ensembles de contraintes.

Ce modèle a permis de résoudre 27 instances sur les 30 instances de la littérature comportant 14 opérations (ESSAFI, DELORME, DOLGUI et GUSCHINSKAYA 2010). A l'époque, (ESSAFI, DELORME, DOLGUI et GUSCHINSKAYA 2010) n'avait résolu que 17 instances.

En se basant sur les travaux réalisés sur les problèmes d'ordonnancement avec gestion de ressources, un code direct d'une solution pourrait être le suivant :

$$X = (\sigma_{(1)}, \sigma_{(2)}, \dots, \sigma_{(Mmax)})$$

où $\sigma_{(s)} = (\sigma_{(s)}^1, \sigma_{(s)}^2, \dots, \sigma_{(s)}^j, \dots, \sigma_{(s)}^{|\sigma_{(s)}|})$ est la séquence des opérations affectées à la station $s, s = 1, Mmax$. Cependant, devant la complexité du problème et le grand nombre de solutions, nous avons rapidement opté pour une approche séquentielle qui consiste à décomposer le problème.

4.4.3 Approche BF-SL : Hybridation (métaheuristique \Leftrightarrow programmation dynamique)

Dans l'approche Balance-First Sequence-Last proposée dans (LAHRICHI, GRANGEON et al. 2021a), la représentation d'une solution s'intéresse uniquement au problème d'équilibrage en sous-estimant les temps de montage. Lors de la construction d'une solution, le séquençement des opérations dans chaque station est réalisé optimalement.

Représentation indirecte

La représentation de la solution décrit uniquement l'affectation des opérations aux stations.

$$A = (a_{(1)}, a_{(2)}, \dots, a_{(Mmax)})$$

où $a_{(s)} = \{a_{(s)}^1, a_{(s)}^2, \dots, a_{(s)}^{a_{(s)}}\}$ est l'ensemble des opérations affectées à la station s . Le séquençement des opérations n'est pas réalisé.

Cette représentation doit respecter les contraintes du problème sauf la contrainte C2 (temps de cycle) qui ne peut être vérifiée qu'une fois le séquençement des opérations réalisé.

Système de voisinage

Le système de voisinage est composé de 3 mouvements réalisés selon une probabilité :

Déplacement d'une opération (et de toutes les opérations qui sont dans la même contrainte d'inclusion) d'une station à une autre station,

Fusion de 2 stations en une seule station,

Division d'une station en 2 stations

tout en respectant toutes les contraintes sauf la contrainte C2 (temps de cycle).

Construction d'une solution à l'aide de la programmation dynamique

L'affectation des opérations aux stations étant définie par le vecteur A , la construction d'une solution consiste à séquencer optimalement les opérations à chaque station. Pour cela, grâce à une analogie (tableau 4.7) entre le problème de séquençement des opérations avec temps de montage dépendant de la séquence et le problème du voyageur de commerce asymétrique avec contraintes de précedence, nous avons utilisé l'algorithme de programmation dynamique proposé par (HELD et KARP 1962).

Elément du TLBP	Elément du ATSP
Opération	Ville
Temps de montage dépendant de la séquence	Distance entre les villes
Séquence d'opération	Circuit hamiltonien
Minimiser la somme des temps de montage	Minimiser la longueur du circuit

TABLE 4.7 – Analogie entre le problème de séquençement des opérations et le problème du voyageur de commerce asymétrique

Construction d'une solution initiale : heuristique itérative

Compte-tenu du grand nombre de contraintes, la construction d'une solution initiale n'est pas évidente. Nous avons proposé une heuristique itérative, représentée par la figure 4.7 s'inspirant de la méthode « branch and cut » et de la génération d'inégalités valides selon 3 étapes :

1- Construction d'un équilibrage Le problème d'équilibrage est résolu à l'aide d'une version relâchée du programme linéaire en nombre entiers du TLBP en considérant que les temps de montage ne dépendent pas de la séquence : le temps de montage d'une opération i est égal au plus petit de ses temps de montage ($\min_{j \in N, i \neq j} \{t_{i,j}, t_{j,i}\}$). Dans cette version, le séquençement des opérations n'est plus considéré, ce qui permet de réduire considérablement le nombre de variables et de contraintes.

2- Séquençement des opérations A partir de l'équilibrage obtenu, les opérations sont séquencées optimalement à l'aide de l'algorithme de programmation dynamique proposé par (HELD et KARP 1962) en considérant les temps de montage

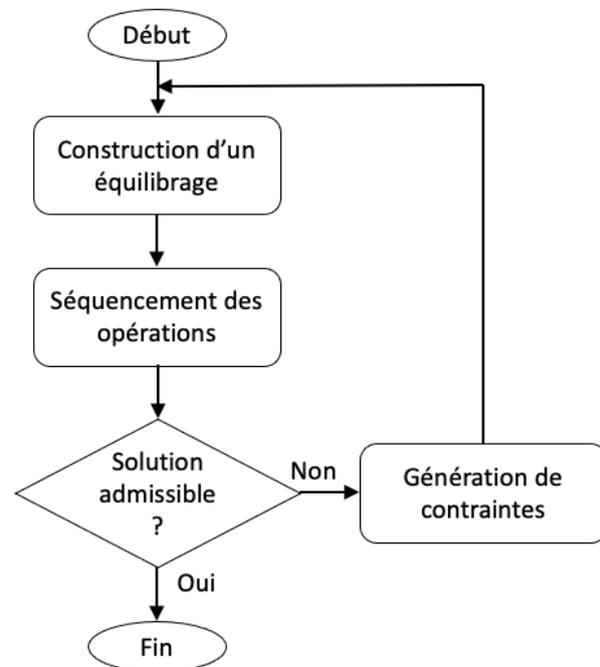


FIGURE 4.7 – Heuristique itérative

3- Génération de contraintes Dans la construction de l'équilibrage, les temps de montage sont sous-estimés et la solution construite lors du séquençement peut ne pas respecter la contrainte C2 (temps de cycle) car le nombre de machines nécessaire à la réalisation des opérations peut être supérieur au nombre de machines autorisé. Si c'est le cas, le processus de résolution est itéré en ajoutant pour chaque station pour laquelle la contrainte C2 n'est pas respectée, une contrainte interdisant l'affectation des opérations obtenue précédemment.

4.4.4 Approche SF-BL - Hybridation (métaheuristique \Leftrightarrow programmation dynamique)

Dans l'approche Sequence-First Balance-Last proposée dans (LAHRICHI, GRANGEON et al. 2021b), la solution est codée sous la forme d'une séquence d'opérations qui sera ensuite découpée optimalement en sous-séquences, chaque sous-séquence étant affectée à une station. Ces travaux s'inspirent des travaux menés par (BEASLEY 1983) présentés dans le chapitre précédent.

Représentation indirecte

La représentation d'une solution est la même que pour le SALBP-1 :

$$\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N)$$

où σ_i est l'opération affectée à la $i^{\text{ème}}$ position de la séquence.

Cette représentation doit respecter la contrainte C1 (contrainte de précédence). La vérification des autres contraintes se fera lors de la construction d'une solution.

Système de voisinage

Etant donné que seule la contrainte C1 (contrainte de précédence) doit être vérifiée, le système de voisinage utilisé est un système de voisinage de type insertion respectant les contraintes de précédence identiques au système de voisinage **Insertion1** proposé pour le SALBP-1.

Construction d'une solution à l'aide de la programmation dynamique : algorithme «split»

L'algorithme de découpage de la séquence est un algorithme de recherche d'un chemin dans un graphe auxiliaire $G = (S, A)$. L'ensemble des sommets $S = \mathcal{O} \cup \{\sigma_0\}$ est composé de l'ensemble des opérations et d'une opération fictive de début de séquence.

Un arc (σ_i, σ_j) signifie que les opérations de la sous-séquence $(\sigma_{i+1}, \sigma_{i+2}, \dots, \sigma_j)$ sont affectées à la même station. Les arcs sont pondérés par le nombre de machines nécessaires pour réaliser la sous-séquence pendant le temps de cycle :

$$c_{\sigma_i, \sigma_j} = \begin{cases} \left\lceil \frac{\sum_{k=i+1}^{j-1} (d_{\sigma_k} + t_{\sigma_k, \sigma_{k+1}}) + d_{\sigma_j} + t_{\sigma_j, \sigma_{i+1}}}{C} \right\rceil & \text{si } \sigma_j > \sigma_{i+1} \text{ (au moins 2 opérations)} \\ \left\lceil \frac{d_{\sigma_{i+1}}}{C} \right\rceil & \text{si } \sigma_j = \sigma_{i+1} \text{ (une seule opération)} \end{cases}$$

Un arc ne peut exister que si la sous-séquence respecte toutes les contraintes sauf C4 (nombre maximum de stations dans la ligne).

Un découpage optimal de la séquence σ consiste à rechercher un plus court chemin comportant au maximum M_{max} arcs afin de respecter la contrainte C4 («constrained shortest path»). Ce problème peut être résolu par un algorithme de Dijkstra ou de Bellman-Ford adapté grâce à un label composé de la longueur du chemin (le nombre de machines) et du nombre d'arcs (le nombre de stations). Si l'algorithme ne trouve pas de chemin (à cause du nombre maximum d'arcs), il n'existe pas d'équilibrage respectant la séquence σ et le nombre de machines utilisées est $+\infty$. Si l'algorithme trouve plusieurs plus courts chemins, ceux-ci sont équivalents en nombre de machines mais peuvent conduire à un nombre de stations différent.

Exemple 3.

La figure 4.8 donne le graphe auxiliaire de la séquence $\sigma = (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)$ de l'instance présentée précédemment (exemple 2). Nous pouvons noter que :

- l'arc $(0,1)$ et tous les arcs au départ de 1 n'apparaissent pas car les opérations 1 et 2 sont liées par une contrainte d'inclusion.
- l'arc $(0,4)$ n'apparaît pas car la séquence d'opérations $(1,2,3,4)$ réalisée par la même station entraînerait un dépassement du nombre de machines autorisé.
- les arcs $(2,6)$, $(2,7)$, $(3,6)$, $(3,7)$, $(4,6)$ et $(4,7)$ n'apparaissent pas car les opérations 5 et 6 sont liées par une contrainte d'exclusion.

Le chemin passant par les sommets (0,2,3,4,5,7) correspond à la solution donnée dans le tableau 4.6 avec 8 machines et 5 stations. Un plus court chemin (en gras dans le graphe), de longueur (7;4), passe par les sommets (0,3,4,5,7) et correspond à la solution donnée par le tableau 4.8. Cette solution utilise 7 machines et 4 stations.

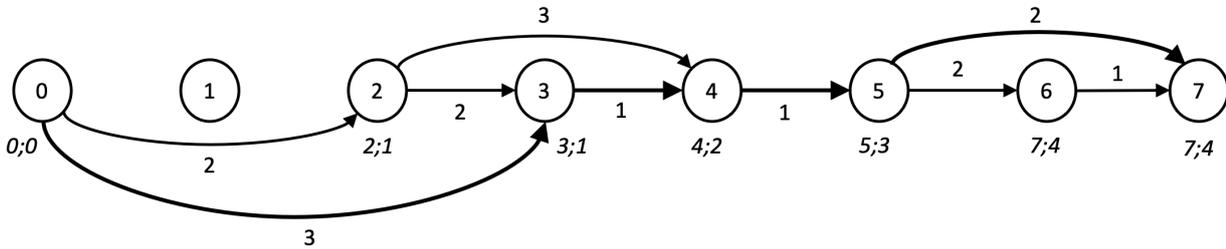


FIGURE 4.8 – Exemple de graphe auxiliaire

Station	1	2	3	4	5	6
Séquence d'opérations	1; 2; 3	4	5	6;7	-	-
Charge	7,5	1,5	2,5	5	0	0
# machine	3	1	1	2	0	0
Position	2	1	1	3	-	-

TABLE 4.8 – Une solution

Construction d'une solution initiale : recherche locale

Dans cette approche, la construction d'une solution initiale respectant toutes les contraintes, c'est à dire une séquence d'opérations pour laquelle il existe un chemin comportant au plus M_{max} arcs dans le graphe auxiliaire, n'est pas évidente. Une première possibilité est d'utiliser l'heuristique de construction d'une solution initiale selon l'approche BF-SL. Une seconde possibilité est l'utilisation d'une recherche locale utilisant l'algorithme «split» en relâchant la contrainte du nombre maximum d'arcs. Le système de voisinage utilisé est **Insertion1** et le critère à minimiser est le nombre de stations (le nombre d'arcs).

Extension à d'autres problèmes d'équilibrage

Contrairement aux approches existantes dans la littérature, l'algorithme de découpage d'une séquence présente l'avantage non négligeable de construire un équilibrage optimal pour une séquence donnée. Cet algorithme peut également être étendu à d'autres problèmes d'équilibrage. Pour cela, deux éléments doivent être définis : la pondération des arcs et le type de chemin recherché.

Par exemple,

- pour le **SALBP-1**, l'objectif est la minimisation du nombre de stations, le temps de cycle étant fixé. Un arc n'existe que si le temps de cycle est respecté pour la séquence correspondante. La pondération des arcs est unitaire. Il s'agit de rechercher le plus court chemin de σ_0 et σ_N . La recherche de ce plus court chemin est similaire à l'application de la règle issue de Next-Fit.

- pour le **SALBP-2**, l'objectif est la minimisation du temps de cycle, le nombre de stations étant fixé. La pondération des arcs est la somme des durées des opérations correspondantes :

$$c_{\sigma_i, \sigma_j} = \sum_{k=i+1}^j d_{\sigma_k}$$

Il s'agit alors de rechercher le chemin de σ_0 et σ_N minimisant la plus grande de ses pondérations et comportant au plus M_{max} arcs (« constrained minimax path »).

Nous avons étendu l'approche à deux autres problèmes d'équilibrage (LAHRICHI, DEROUSI, GRANGEON et NORRE 2019, LAHRICHI, DEROUSI, GRANGEON et S.NORRE 2020) :

- le Robotic Assembly Line Balancing Problem (**RALBP**) : les hypothèses sont identiques à celles du SALBP mais les durées des opérations dépendent du type de robot affecté à la station. Un robot peut réaliser toutes les opérations mais avec une performance dépendant de son type. En complément de la recherche d'un équilibrage, il s'agit de définir également le type de robot qui sera affecté à chaque station utilisée qui minimise le nombre de robots (**RALBP-1**) ou le temps de cycle (**RALBP-2**).
- le Sequence-Dependent Robotic Assembly Line Balancing Problem (**SDRALBP**) : aux hypothèses du RALBP s'ajoutent des temps de montage dépendant de la séquence. Il s'agit de rechercher une affectation des opérations aux stations, un séquençement de ces opérations à chaque station et une affectation d'un type de robot par station qui minimise le nombre de robots (**SDRALBP-1**) ou le temps de cycle (**SDRALBP-2**).

Pour ces 4 problèmes, nous avons défini la pondération des arcs et le problème de recherche d'un chemin.

Le tableau 4.9 présente un résumé des résultats obtenus.

Problème	Problème de recherche d'un chemin	Complexité
SALBP-1	Shortest path problem	$O(N^2)$
SALBP-2	Constrained minimax path problem	$O(N^4)$
TLBP	Constrained shortest path problem	$O(N^4)$
RALBP-1	Shortest path problem	$O(N^2)$
RALBP-2	Constrained minimax path problem	$O(N^4)$
SDRALBP-1	Shortest path problem	$O(N^2)$
SDRALBP-2	Constrained minimax path problem	$O(N^4)$

TABLE 4.9 – Problème à résoudre dans l'algorithme de découpage d'une séquence

4.4.5 Résultats

La métaheuristique utilisée dans l'approche BF-SL est un recuit simulé homogène dans lequel les pondérations des différents mouvements sont adaptées au fur et à mesure de l'algorithme. La métaheuristique utilisée dans l'approche SF-BL est une recherche locale itérée (ILS). Les premières expérimentations ont permis d'obtenir les meilleurs résultats avec 100 recherches locales de 10 000 itérations. Nous avons comparé nos résultats avec les travaux de (BORISOVSKY et al. 2013) qui propose un algorithme génétique hybride qui utilise également une représentation indirecte sous la forme d'une séquence géante mais la construction d'une solution est réalisée par une heuristique et un programme linéaire en nombres entiers. La résolution du programme linéaire étant couteux en temps, celle-ci n'est réalisée que pour les solutions prometteuses.

Le tableau 4.10 présente les résultats obtenus par les 2 approches comparés avec les résultats obtenus par l'algorithme générique hybride (GA) de (BORISOVSKY et al. 2013). Les instances comportent 200 opérations et au maximum 200 stations. Les résultats des approches SF-BL et BF-SL sont tous donnés pour 10 exécutions de chaque métaheuristique : min = meilleur résultat obtenu, max = moins bon résultat, moy = résultat moyen, ET = écart-type.

Les 2 approches proposées sont robustes et ont permis clairement d'améliorer les résultats de la littérature. Pour ces premières expérimentations, l'approche BF-SL fournit les meilleurs résultats. Cependant, après examen de la structure des instances, il pourrait être pertinent de s'intéresser à d'autres instances pour compléter cette expérimentation. Les expérimentations sur le RALBP-2 et le SDRALBP-2 ont également permis de valider l'algorithme de découpage et d'améliorer les résultats de la littérature de (MUKUND NILAKANTAN et al. 2015), (BORBA et al. 2018) et (NILAKANTAN JANARDHANAN et al. 2019).

Instance	Approche SF-BL				Approche BF-SL				GA	
	min	max	moy	ET	min	max	moy	ET	min	moy
A1	28	29	28,2	0,4	26	28	26,9	0,539	33	35,44
A2	26	27	26,6	0,49	25	26	25,6	0,49	33	34
A3	26	27	26,9	0,3	25	27	25,5	0,671	31	32,1
A4	26	27	26,6	0,49	25	26	25,7	0,458	29	30,6
A5	27	28	27,4	0,49	25	27	26,3	0,64	32	33,33
A6	26	28	27	0,447	25	26	25,6	0,49	32	33,28
A7	28	29	28,3	0,458	27	28	27,4	0,49	34	35,86
A8	28	29	28,3	0,458	27	28	27,2	0,4	31	32,8
A9	27	27	27	0	26	27	26,2	0,4	30	31,7
A10	29	30	29,9	0,3	28	30	28,8	0,6	32	34,9
A11	26	27	26,9	0,3	25	26	25,4	0,49	30	31,8
A12	28	29	28,3	0,458	27	28	27,2	0,4	31	33,1
A13	28	29	28,2	0,4	27	28	27,5	0,5	33	35,25
A14	27	28	27,3	0,458	26	27	26,4	0,49	31	32,9
A15	27	28	27,3	0,458	25	26	25,9	0,3	33	34

TABLE 4.10 – TLBP - Comparaison des 2 approches et de la méthode proposée par (BORISOVSKY et al. 2013)

4.5 Problématique industrielle

En parallèle des travaux théoriques menés sur le SALBP-1 et le PALBP, dans le cadre d'un contrat de recherche avec le constructeur automobile PSA Peugeot Citroën, nous avons travaillé sur la définition et la proposition d'une maquette logicielle d'un outil d'aide à la décision pour le rééquilibrage des lignes d'assemblage de PSA. Ce travail a eu lieu dans le cadre du stage de Master Recherche de Patrice Leclair en 2005. La problématique a ensuite été étendue, plus tard, au problème de placement des mobiliers en bord de ligne, pendant son post-doctorat en 2010.

4.5.1 Présentation de la ligne et des contraintes industrielles

La ligne d'assemblage considérée, une *Two-sided straight line*, est représentée par la figure 4.9. Elle est constituée de stations de travail (section sur la figure 4.9) dans lesquelles sont progressivement assemblés des véhicules. Sur chaque station, sont disposés plusieurs postes de travail (6 postes au maximum par station). Un poste de travail est occupé par des opérateurs (4 opérateurs au maximum par poste de travail). Les véhicules défilent sur la ligne à vitesse constante. Les opérateurs

doivent réaliser différentes opérations élémentaires sur les véhicules se présentant à eux. Les véhicules peuvent être de différents types et nécessitent alors des opérations différentes (*mixed-model*).

Les opérations requises par les véhicules dépendent de leur type. La durée d'exécution d'une opération est la même quel que soit le type du véhicule. Chaque opération est également caractérisée par un espace - représenté par une longueur - correspondant à l'espace requis pour l'entreposage des composants (vis, écrous, bloc moteur, huile, liquide de refroidissement, ...) et outils (perceuses, visseuses, ...) nécessaires à sa réalisation.

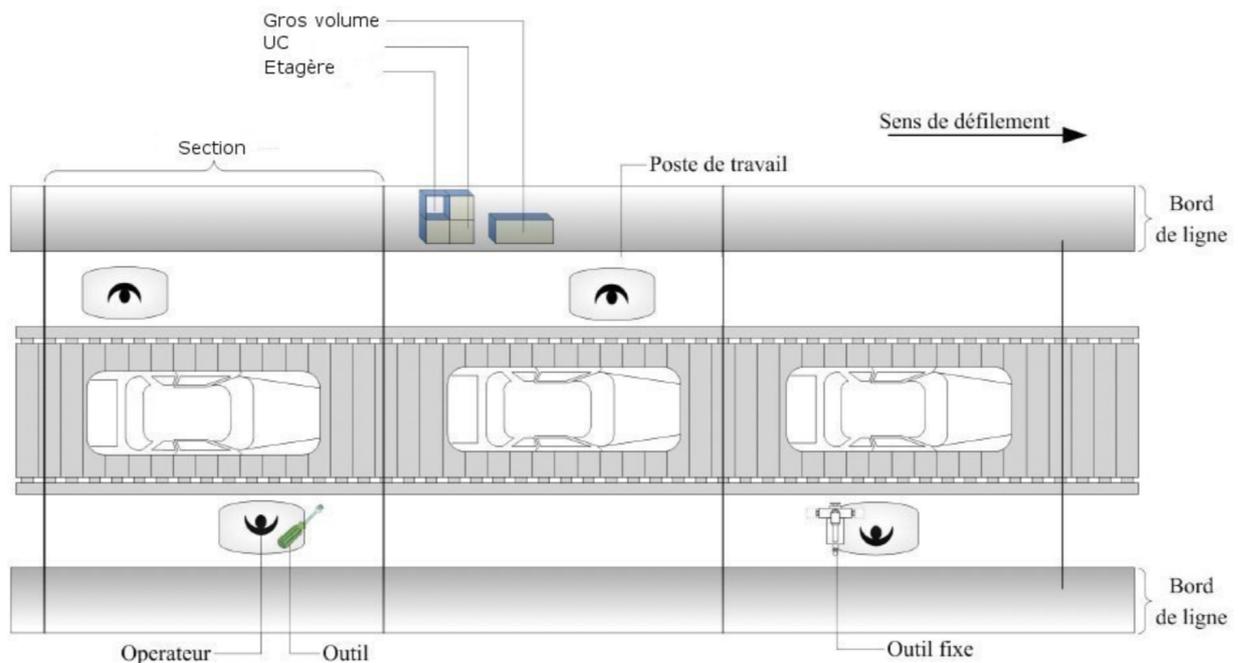


FIGURE 4.9 – Ligne d'assemblage de véhicules

Un équilibrage consiste en l'affectation des opérations aux postes de travail pour une séquence de véhicules à produire. Cette affectation est soumise à des contraintes :

C1 - contrainte de précédence : contrainte similaire à celle du SALBP-1. Si l'opération i doit précéder l'opération j alors :

- soit les opérations i et j sont affectées au même poste d'une station,
- soit l'opération i est affectée à une station qui précède, dans la ligne, la station affectée à l'opération j .

Les deux opérations ne peuvent pas être affectées à deux postes différents dans une même station.

C2 - contrainte de temps de cycle : contrainte identique à celle du SALBP-1.

C3 - contrainte sur le temps opérateur : la somme des durées des opérations affectées à un opérateur doit être inférieure à la durée de travail journalière de l'opérateur

C4 - contrainte sur les longueurs des sections : l'espace nécessaire à la réalisation des opérations affectées à une station ne doit pas excéder la longueur de la station.

C5 - contrainte de hauteur de travail : contrainte identique à la contrainte d'accessibilité du RTLBP.

Le problème d'équilibrage de cette ligne d'assemblage a été traité dans (BOUDEVIN 2003).

4.5.2 Le problème de rééquilibrage

Les problèmes d'équilibrage et de séquençage couvrent différents horizons de planification (SCHOLL 1999) et montrent un certain nombre d'interdépendances (figure 4.10). Les trois niveaux des problèmes d'équilibrage correspondent aux long et moyen termes et représentent différents niveaux d'agrégation. L'**installation** correspond à l'étape de conception d'une ligne d'assemblage : la configuration, l'agencement et les quantités de ressources sont décidés. Le **réarrangement** concerne les changements majeurs qui ont lieu dans la vie de la ligne d'assemblage - la structure et le procédé de fabrication peuvent être modifiés. Le **rééquilibrage** concerne la modification de l'équilibrage de la ligne : celui-ci doit tenir compte des modifications des données telles que la durée des opérations ou la demande.

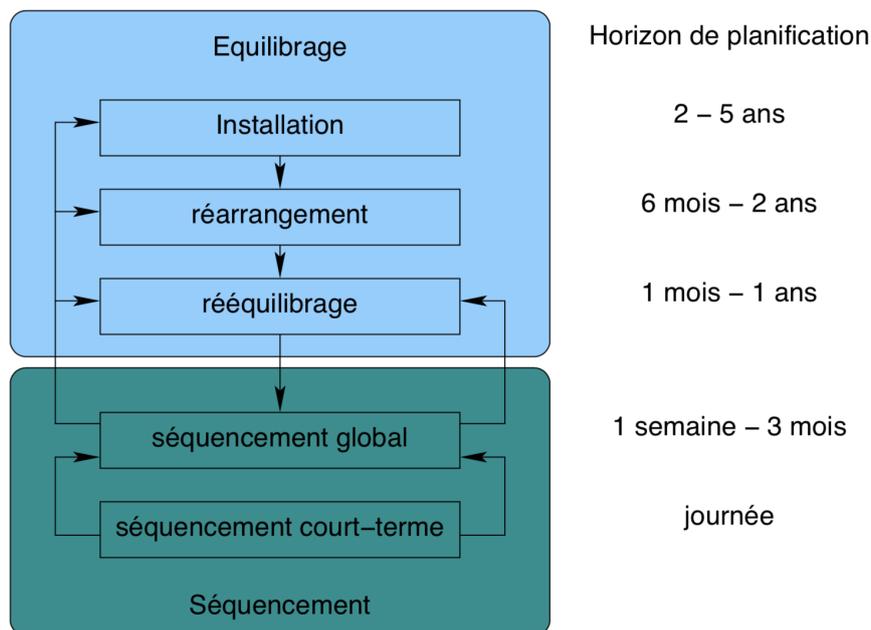


FIGURE 4.10 – Equilibrage et Séquençage - horizons de planification (SCHOLL 1999)

Les deux niveaux des problèmes de séquençage correspondent au court terme. Le **séquençage global** tient compte de la demande et décrit les types et les quantités à produire. Le **séquençage court-terme** est la séquence des produits à fabriquer - cette liste doit respecter des contraintes technologiques comme l'obligation d'alternance des produits.

Dans le problème étudié, le **séquençage global** fournit, chaque mois, une liste des véhicules à produire pour le mois suivant ainsi que les quantités. L'affectation des opérations aux postes de travail étant calculée pour le volume de véhicules à produire pendant le mois m , cette affectation peut ne plus respecter les contraintes avec les volumes du mois $m + 1$. Par exemple, l'augmentation de la quantité à produire peut entraîner le dépassement du temps de cycle. L'ajout d'un type de véhicule qui n'était pas produit le mois m peut entraîner l'apparition de nouvelles opérations.

Il s'agit donc d'adapter l'équilibrage du mois m au volume de véhicules à produire au mois $m + 1$ de manière à respecter l'ensemble des contraintes grâce au déplacement d'opérations. Outre le respect des contraintes, les objectifs considérés sont :

- la minimisation du nombre de postes de travail,
- le lissage de la charge - entre les postes de la ligne ou au sein d'un poste, entre les différents modèles de véhicules à produire.

tout en déplaçant un minimum d'opérations : le déplacement d'une opération implique le déplacement des outils et pièces nécessaires à sa réalisation et peut engendrer la formation d'un opérateur.

4.5.3 Heuristiques pour le rééquilibrage

Compte-tenu de la complexité du problème, nous avons opté dans (GRANGEON, LECLAIRE et al. 2011) pour la proposition de 3 heuristiques, utilisées de manière successive (figure 4.11) :

Feasible Load Based (FLB) : Le principe est de décharger les postes ne respectant pas les contraintes d'autant d'opérations que nécessaire afin de respecter les contraintes. Les opérations sont déplacées vers les postes les plus chargés et tels qu'aucune contrainte ne soit violée. Si aucun des postes existants ne permet le déplacement d'une opération, un nouveau poste est créé. A la fin de cette heuristique, toutes les contraintes prises en compte sont satisfaites.

Maximum Load Based (MLB) : Le principe est de vider les postes les moins chargés vers les postes les plus chargés. Elle ne fonctionne qu'à partir d'un équilibrage admissible et tente de supprimer des postes. Les postes sont considérés les uns après les autres et toutes les opérations d'un poste sont déplacées, une à une, si possible. Etant donné qu'un des objectifs est la minimisation du nombre d'opérations déplacées, dès qu'une opération d'un poste ne peut pas être déplacée, la composition initiale du poste est rétablie.

Smoothed Load Based (SLB) : L'heuristique s'intéresse au lissage de la charge de la ligne, l'objectif du lissage est d'homogénéiser la charge des opérateurs. Le principe est de décharger les postes les plus chargés vers les postes les moins chargés afin de réduire l'écart (représenté par un pourcentage) existant entre les charges des opérateurs. Un poste ne pouvant se décharger que vers un poste de même hauteur, le lissage s'effectue pour chaque hauteur de travail.

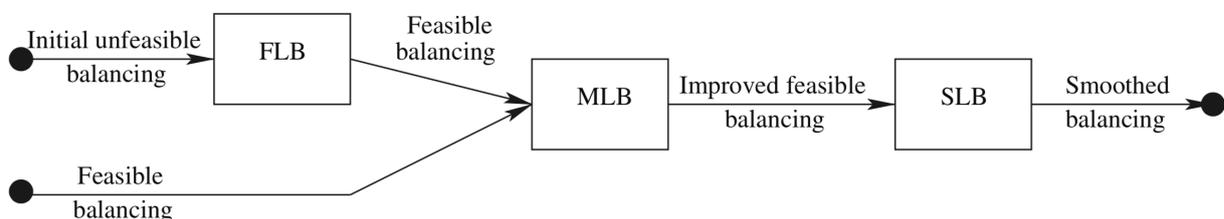


FIGURE 4.11 – Chaînage des heuristiques pour le rééquilibrage (GRANGEON, LECLAIRE et al. 2011)

Les heuristiques proposées ont été intégrées, dans une maquette logicielle d'aide à la décision comprenant également une interface graphique permettant de gérer les données et de représenter la ligne de montage et l'affectation des opérations aux postes. Les expérimentations ont porté sur des instances industrielles concernant entre 13 000 et 21 000 véhicules soit de 490 à 620 opérations. Les résultats ont montré que FLB entraîne le déplacement d'entre 10% et 17% d'opérations et que MLB n'apporte aucune diminution du nombre poste.

4.5.4 Placement des mobiliers en bord de ligne

Les outils et composants nécessaires à la réalisation des opérations sont stockés en bord de ligne (figure 4.9 au début de la section). Dans les données initiales,

- une majoration de 20% des durées des opérations était appliquée pour assurer la prise en compte des temps de déplacement pour prendre les outils et composants,
- l'espace de stockage était considéré de façon pessimiste pour prendre en compte la présence d'obstacles,

— le stockage redondant dans une même section de composants était autorisé.

Nous avons donc poursuivi les travaux dans le but d'estimer plus finement le temps de déplacement des opérateurs entre le véhicule et la zone de stockage pendant un temps de cycle ainsi que l'espace de stockage nécessaire aux opérations affectées à la station.

L'approche proposée dans (GRANGEON N. et al. 2008) se compose de deux éléments :

- la résolution du problèmes de placement des composants et outil en bord de ligne réalisée à l'aide d'heuristiques à base de règles de priorité. Pour chaque section, à partir de la liste ordonnée par fréquence d'utilisation des composants et outils nécessaires pour réaliser toutes les opérations affectées à tous les postes de travail de la section, des règles de bon sens sont utilisées pour "ranger" les composants et outils dans des étagères ou des contenants ou au sol selon leur type.
- le calcul du temps de déplacement de l'opérateur par poste de travail et par type de véhicule. A partir de la liste des composants et outils nécessaires pour réaliser les opérations affectées à l'opérateur pour un type de véhicule, le temps de déplacement de l'opérateur pour le type de véhicule est composé du temps nécessaire à l'opérateur pour aller du véhicule au bord de ligne (plus précisément à l'emplacement du premier composant ou outil) puis à tous les emplacements des composants et outils nécessaires, et du temps pour revenir au véhicule qui a continué sa progression dans la section.

Ces éléments ont été intégrés dans la maquette logicielle qui fonctionne de manière itérative selon trois étapes :

Rééquilibrage : application du chainage des heuristiques FLB, MLB et SLB,

Placement en bord de ligne : placement des composants et outils en bord de ligne et calcul des temps de déplacement pour tous les postes de travail et tous les types de véhicules

Vérification des contraintes : intégration des temps de déplacement des opérateurs et vérification des contraintes C2 (temps de cycle), C3 (temps opérateur) et C4 (longueur des sections). Si au moins une contrainte n'est pas respectée, l'étape de rééquilibrage est relancée.

Les résultats obtenus ont montré une très forte occupation des bords de ligne qui pouvaient entraîner des déplacements de l'opérateur dans des sections voisines. Une visite d'une ligne d'assemblage nous a amenés à constater des chevauchements de contenants ou de contenants et d'obstacles pour pallier ce problème.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté nos travaux majeurs sur les problèmes d'équilibrage et de rééquilibrage de ligne d'assemblage. Ces travaux trouvent leur origine dans une collaboration de longue date entre le LIMOS et la société PSA. Nous avons proposé des méthodes pour des problèmes théoriques tout en ayant à coeur d'intégrer également des contraintes industrielles.

Plusieurs approches ont été considérées, mêlant des métaheuristiques, des heuristiques et la programmation dynamique. Ces approches reposent sur deux atouts majeurs :

- la représentation d'une solution sous la forme d'une permutation d'opérations. L'espace des représentations parcouru par la métaheuristique est de taille réduite par rapport à l'espace des solutions et il est facile de construire des représentations voisines car le nombre de contraintes à vérifier est plus petit que dans le problème de départ.
- l'utilisation d'un algorithme utilisant la programmation dynamique pour construire une solution optimale au problème à partir d'une permutation d'opérations. Nous avons montré que cet algorithme peut être appliqué à de nombreux problèmes.

Les problèmes d'équilibrage sont des problèmes anciens, beaucoup moins populaires que les problèmes d'ordonnement. Cependant, avec l'arrivée des préoccupations environnementales et du concept de l'usine 4.0, ces problèmes devraient trouver leur place avec de nouvelles problématiques telles que le désassemblage qui demande d'intégrer, entre autres, des facteurs de risque ou de reconfiguration dynamique pour adapter une ligne à une demande fluctuante. J'ai d'ailleurs également eu l'occasion de réfléchir à d'autres variantes du problème de base :

- le SALBP-1 stochastique avec des durées d'opération suivant une loi normale,
- le Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem (stage de master de Safa Mrad),
- le SALPB avec minimisation du pic de consommation (stage de master de Arnauld Tuyaba).

Références

- SALVESON, M. (1955). « The Assembly Line Balancing Problem ». In : *Journal of Industrial Engineering* 6.18-25.
- HELD, M. et R. M. KARP (1962). « A Dynamic Programming Approach to Sequencing Problems ». In : *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics* 10.1, p. 196-210.
- GRAHAM, R., E. LAWLER, J. LENSTRA et A. KAN (1979). « Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling : a Survey ». In : *Discrete Optimization II*. Sous la dir. de P. HAMMER, E. JOHNSON et B. KORTE. T. 5. Annals of Discrete Mathematics. Elsevier, p. 287-326.
- BEASLEY, J. (1983). « Route first—Cluster second methods for vehicle routing ». In : *Omega* 11.4, p. 403-408.
- BAYBARS, I. (1986). « A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem ». In : *Management Science* 32, p. 909-932.
- TALBOT, F. B., J. H. PATTERSON et W. V. GEHRLEIN (1986). « A Comparative Evaluation of Heuristic Line Balancing Techniques ». In : *Management Science* 32.4, p. 430-454.
- WEE, T. et M. MAGAZINE (1986). « Assembly line balancing as generalized bin packing ». In : *Operations Research Letters* 1.56-58.
- HACKMAN, S. T., M. J. MAGAZINE et T. S. WEE (1989). « Fast, Effective Algorithms for Simple Assembly Line Balancing Problems ». In : *Operations Research* 37.6, p. 916-924.
- FALKENAUER, E. et A. DELCHAMBRE (1992). « A Genetic Algorithm for Bin Packing and Line Balancing ». In : *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA92)*, Los Alamitos, Californie, p. 1186-1192.
- COFFMAN, E., M. GAREY et D. JOHNSON (1996). « Approximation algorithms for bin packing : a survey ». In : *Approximation algorithms for NP-hard problems*. D.S. Hochbaum, p. 46-93.
- SCHOLL, A. et S. VOSS (1996). « Simple assembly line balancing : heuristic approaches ». In : *Journal of Heuristics* 2, p. 217-244.
- CHIANG, W. (1998). « The application of a tabu search metaheuristic to the assembly line balancing problem ». In : *Annals of Operations Research* 77, p. 209-227.
- DOLGUI, A., N. GUSCHINSKI et G. LEVIN (1999). « On problem of optimal design of transfer lines with parallel and sequential operations ». In : *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*. Sous la dir. de J. FUERTES. T. 1, p. 329-324.
- SCHOLL, A. (1999). *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*. Physica-Verlag, Heidelberg.
- SCHOLL, A. et R. KLEIN (1999). « Balancing assembly lines effectively - a computational comparison ». In : *European Journal of Operational Research* 114, p. 50-58.
- DOLGUI, A., N. GUSCHINSKY et G. LEVIN (2000). « Decomposition Methods to Optimise Transfer Line with Parallel and Sequential Machining ». In : *IFAC Proceedings Volumes* 33.17. 2nd IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL 2000), Grenoble, France, 5-8 July 2000, p. 983-988.

- BOUTEVIN, C. (2003). « Problèmes d'ordonnancement et d'affectation avec contraintes de ressources de type RCPSp et line balancing ». Thèse de doct. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
- BOUTEVIN, C., M. GOURGAND et S. NORRE (2003). « Stochastic algorithms based on simulated annealing for the line balancing problems ». In : *International Conference on Industrial Engineering and Production Management (IEPM 03), Porto, 26-28 mai 2003*.
- BECKER, C. et A. SCHOLL (2006). « A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing ». In : *European Journal of Operational Research* 168, p. 694-715.
- GÖKÇEN, H., K. AGPAK et R. BENZER (2006). « Balancing of parallel assembly lines ». In : *International Journal of Production Economics* 103.2, p. 600-609.
- MOUSLI, M. (2006). « Taylor et l'organisation scientifique du travail ». In : *Alternatives Economiques* 251.
- BOYSEN, N., F. M. et A. SCHOLL (2007). « A classification of assembly line balancing problems ». In : *European Journal of Operational Research* 183, p. 674-693.
- GOURGAND, M., N. GRANGEON et S. NORRE (2007). « Metaheuristics based on Bin Packing for the line balancing problem ». In : *RAIRO Operational research* 41.2, p. 193-211.
- GRANGEON N., P. LECLAIRE et S. NORRE (2008). « Placement de contenants dans une ligne d'assemblage ». In : *MOSIM'08 (7ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation), Paris, avril 2008*.
- SCHOLL, A. et N. BOYSEN (2008). « The multiproduct parallel assembly lines balancing problem : model and optimization procedure ». In : *Jena Research Papers in Business and Economics* 13.
- SCHOLL, A. et N. BOYSEN (2009). « Designing parallel assembly lines with split workplaces : model and optimization procedure ». In : *International Journal of Production Economics* 119.90-100.
- ESSAFI, M., X. DELORME et A. DOLGUI (2010). « Balancing Machining Lines : a Two-phase Heuristic ». In : *Studies in Informatics and Control* 19.3, p. 243-252.
- ESSAFI, M., X. DELORME, A. DOLGUI et O. GUSCHINSKAYA (2010). « A MIP approach for balancing transfer line with complex industrial constraints ». In : *Computers & Industrial Engineering* 58.393-400.
- GRANGEON, N., P. LECLAIRE et S. NORRE (2011). « Heuristics for the re-balancing of a vehicle assembly line ». In : *IJPR (International Journal of Production Research)* 49.22, p. 6609-6628.
- GRANGEON, N. et S. NORRE (2012). « Extending metaheuristics based on bin packing for SALBP to PALBP ». In : *EJIE (European Journal of Industrial Engineering)* 6, p. 713-732.
- SEWELL, E. C. et S. H. JACOBSON (2012). « A branch, bound, and remember algorithm for the simple assembly line balancing problem ». In : *INFORMS Journal on Computing* 24.3, p. 433-442.
- BATTAÏA, O. et A. DOLGUI (2013). « A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches ». In : *International Journal of Production Economics* 142, p. 259-277.
- BORISOVSKY, P. A., X. DELORME et A. DOLGUI (2013). « Genetic algorithm for balancing reconfigurable machining lines ». In : *Computers & Industrial Engineering* 66.3, p. 541-547.
- OTTO, A., C. OTTO et A. SCHOLL (2013). « Systematic data generation and test design for solution algorithms on the example of SALBPGen for assembly line balancing ». In : *European Journal of Operational Research* 228.1, p. 33-45.
- MORRISON, D. R., E. C. SEWELL et S. H. JACOBSON (2014). « An application of the branch, bound, and remember algorithm to a new simple assembly line balancing dataset ». In : *European Journal of Operational Research* 236.2, p. 403-409.
- MUKUND NILAKANTAN, J., S. G. PONNAMBALAM, N. JAWAHAR et G. KANAGARAJ (2015). « Bio-inspired search algorithms to solve robotic assembly line balancing problems ». In : *Neural Computing and Applications* 26.6, p. 1379-1393.
- BORBA, L., M. RITT et C. MIRALLES (2018). « Exact and heuristic methods for solving the Robotic Assembly Line Balancing Problem ». In : *European Journal of Operational Research* 270.1, p. 146-156.

- HAZIR, O. et A. DOLGUI (2019). « A Review on Robust Assembly Line Balancing Approaches ». In : *IFAC-PapersOnLine*. T. 52. 13, p. 987-991.
- LAHRICHI, Y., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2019). « Polynomial Algorithm For Balancing a Sequence of Operations in Reconfigurable Transfer Lines ». In : *MIM 2019 (Manufacturing Modeling, Management and Control), Berlin (Allemagne)*. T. 52. 13, p. 981-986.
- LI, J., X. CHEN, Z. ZHU, C. YANG et C. CHU (2019). « A branch, bound, and remember algorithm for the simple disassembly line balancing problem ». In : *Computers & Operations Research* 105, p. 47-57.
- NILAKANTAN JANARDHANAN, M., Z. LI, G. BOCEWICZ, Z. BANASZAK et P. NIELSEN (2019). « Metaheuristic algorithms for balancing robotic assembly lines with sequence-dependent robot setup times ». In : *Applied Mathematical Modelling* 65, p. 256-270.
- AGUILAR, H., A. GARCIA-VILLORIA et R. PASTOR (2020). « A survey of the parallel assembly lines balancing problem ». In : *Computers & Operations Research* 124, p. 105061.
- LAHRICHI, Y., L. DEROUSSI, N. GRANGEON et S. NORRE (2020). « A min-max path approach for balancing robotic assembly lines with sequence-dependent setup times ». In : *MOSIM 2020 (Modélisation et Simulation)*. 12-14 novembre 2020, 3ème Best Awards Paper.
- LAHRICHI, Y., N. GRANGEON, L. DEROUSSI et S. NORRE (2021a). « A Balance-First Sequence-Last Algorithm to design RMS - A Matheuristic with performance guaranty to balance Reconfigurable Manufacturing Systems ». In : *Journal of Heuristics Special issue on Matheuristics* 27, p. 107-132.
- LAHRICHI, Y., N. GRANGEON, L. DEROUSSI et S. NORRE (2021b). « A new split-based hybrid metaheuristic for the reconfigurable transfer line balancing problem ». In : *IJPR (International Journal of Production Research)* 59.4, p. 1127-1144.
- LAHRICHI, Y. (2021). « Balancing reconfigurable or robotic assembly lines : exact and hybrid methods ». Thèse de doct. Université Clermont Auvergne.

Chapitre 5

Perspectives

Sommaire

5.1	Introduction	137
5.2	Des systèmes de production de biens et de services flexibles et durables	138
5.2.1	Flexibilité	138
5.2.2	Durabilité	139
5.3	Métaheuristiques hybrides	140
5.4	Quelques problématiques	141
5.4.1	Conception et pilotage d'une usine ultra-flexible	141
5.4.2	Conception de réseaux et d'optimisation de tournées autour de la mise en place de circuits courts alimentaires de proximité	142
5.4.3	Prise en compte de la consommation énergétique dans l'équilibrage des lignes d'assemblage	143
5.5	A suivre...	144
	Références	144

5.1 Introduction

Depuis la première révolution industrielle, déclenchée et soutenue par l'invention de la machine à vapeur, de nombreux changements, inventions et innovations technologiques sont apparus, marquant des changements radicaux dans le mode de fonctionnement de l'industrie.

La première révolution industrielle a commencé vers 1780 et a été marquée par la transition vers de nouveaux processus de fabrication qui comprenaient les premiers efforts de mécanisation et le développement initial de machines-outils utilisant la vapeur comme source de l'énergie.

La deuxième révolution industrielle a été caractérisée par l'introduction d'innovations technologiques majeures telles que l'utilisation de l'électricité, la téléphonie et l'invention du moteur à combustion interne. Au cours de cette révolution, la production de masse et les lignes d'assemblage ont été introduites et se sont généralisées.

La troisième révolution industrielle, est une révolution numérique où les technologies de l'information et de l'électronique ont développé l'automatisation des processus de production, rendue possible par deux inventions majeures : l'automate programmable industriel et le robot.

L'évolution des systèmes cyber-physiques et leur intégration dans les écosystèmes numériques de toute la chaîne de valeur de l'industrie ont contribué à l'émergence de la quatrième révolution industrielle, appelée «Usine 4.0» suivie très rapidement par l'«Usine 5.0» ou industrie collaborative qui remet l'humain au centre du système de production. Mise en évidence pour la première fois lors de la Foire de Hanovre de 2011, l'«Usine 4.0» ou usine du futur correspond à une nouvelle

façon d'organiser les moyens de production : des usines «intelligentes», où tout est réalisé en interaction entre les produits, les machines et les opérateurs, liés dans un réseau lui-même relié à l'extérieur.

Mon projet de recherche qui pourrait s'intituler « **Conception et pilotage de systèmes de production de biens et de services flexibles et durables** », s'intègre dans cette transformation de l'outil de production avec le souhait de prendre en compte des préoccupations environnementales. Jusqu'à présent, ces thématiques étaient assez peu présentes dans mes travaux.

Ce projet s'intègre dans le projet i-site cap 20-25 de l'Université Clermont Auvergne articulé autour du thème : « Concevoir des modèles de vie et de production durables » et plus particulièrement au travers de deux thèmes du « CIR 2 : Systèmes et services innovants pour les transports et la production » : « Mobilité innovante », centré autour du LabEx IMobS3 et « Usine du futur » qui se concentre sur la révolution induite par l'arrivée massive du numérique au cœur des ateliers de production.

5.2 Des systèmes de production de biens et de services flexibles et durables

Cette transformation de l'outil de production va permettre de répondre aux nouveaux modes de consommation. Certains consommateurs s'orientent vers des produits hautement personnalisés ou en petites séries, on parle de « personnalisation de masse ». D'autres vont se tourner vers le « consommer mieux » tout en étant plus soucieux de l'environnement et de l'utilité sociale. Que ce soit pour acheter local ou en ligne, le monde de la logistique et du transport connaît une forte hausse d'activité.

5.2.1 Flexibilité

La personnalisation de masse nécessite des systèmes de production réactifs et flexibles pour produire des produits individualisés avec des lots de taille dynamique à grande échelle et de manière rentable. Par conséquent, les systèmes de production doivent réagir rapidement et faire preuve d'une grande adaptabilité pour répondre à l'évolution des demandes et des aléas de la chaîne d'approvisionnement. Les décisions doivent s'adapter aux environnements de production dynamiques en modifiant les configurations du système et les plans de production tout en maintenant des performances stables.

Un système de production flexible est donc capable de s'adapter aux divers changements de son environnement, sans qu'il y ait besoin d'engager de nouveaux investissements en ressources, ou d'engendrer des pertes de temps sans valeur ajoutée. La notion de système de production flexible n'est pas récente et remonte aux années 1980. Selon (BRAUNER et al. 2005), un système de production flexible admet trois sous-systèmes :

- un système de fabrication composé de machines à commande numérique capables de changements autonomes d'outils ;
- un système automatisé de transport/manutention/stockage : réseau de chariots filoguidés, tapis roulants avec embranchements, robots dédiés au déplacement des pièces.
- un système informatique de contrôle assurant des fonctions de planification de la production, suivi de la production afin de surveiller et de piloter le déroulement de la production.

Deux types de « robot » peuvent être identifiés :

- des robots « ressources de production » qui, organisés en lignes ou en cellules, réalisent des opérations d'usinage et/ou d'assemblage apportant de la valeur ajoutée. Au-delà du robot

industriel traditionnel qui a été créé pour améliorer la cadence et le rendement d'une ligne de production, les robots collaboratifs permettent une collaboration entre le robot et l'humain (MAKRIS 2021) apportant ainsi de la flexibilité.

- des robots «ressources de transport» qui réalisent le transport des matières premières, des produits semi-finis et finis. Apparus dans les années 50, les AGV (Automatic Guided Vehicle) laissent progressivement la place à des versions plus autonomes telles que les AIV (Autonomous Intelligent Vehicle) ou les AMR (Autonomous Mobile Robot) qui s'adaptent en temps réel à l'environnement immédiat.

Dans la poursuite de mes travaux, j'envisage de m'intéresser à divers systèmes de production flexibles tels que :

- les **Systèmes de Production Reconfigurables** ou **lignes d'assemblage robotisées** telles qu'abordées dans le chapitre 4. La flexibilité est assurée par la capacité de ces systèmes à se reconfigurer rapidement. Jusqu'à présent, mes travaux ne considéraient qu'un seul type de produit. Une piste de travail concerne les problématiques d'équilibrage intégrant des produits similaires («Mixed-Model») voire complètement différents («Multi-Model») jusqu'aux problèmes de rééquilibrage.
- le **Job-Shop Flexible avec transport**. Le problème d'ordonnancement du Job-Shop Flexible est souvent mentionné dans le contexte de l'usine 4.0 (LIAQAIT et al. 2021). Dans le chapitre 2, des hypothèses simplificatrices permettaient de considérer les ressources de transport de manière simple mais il serait intéressant de considérer le réseau de guidage et les interactions avec les ressources de transport.

5.2.2 Durabilité

Depuis le début du XXème siècle, le développement de nos sociétés occidentales repose sur l'accès à une énergie abondante, produite en majorité à partir de sources d'origine fossile. Ces ressources sont épuisables et très émettrices de Gaz à Effet de Serre (GES) et de pollutions locales impactant notamment la qualité de l'air.

Sur son site Internet, l'ADEME a pour objectif *de permettre la décarbonation de l'économie et l'atteinte de la neutralité carbone à 2050, ainsi que la réduction de nos impacts sur l'environnement. La priorité est d'abord de réduire nos consommations d'énergie par des efforts de sobriété et d'efficacité, ensuite de substituer le recours aux énergies fossiles par des sources d'énergie aux très faibles émissions de gaz à effet de serre telles que les énergies renouvelables (EnR) : géothermie, biomasse, hydroélectricité, éolien, solaire, biogaz, ..., ou encore par la récupération de chaleur (issue des data center par exemple).*

Au niveau mondial, le contexte énergétique est devenu de plus en plus complexe au cours des dernières décennies. La crise énergétique déclenchée par l'invasion de l'Ukraine par la Russie a des conséquences profondes pour les ménages, les entreprises et les économies entières.

En 2021, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE - «World Energy Outlook 2021») constatait une augmentation de 6% de la demande mondiale d'électricité, suite au rebond économique mondial après la pandémie du Covid-19. C'est la plus forte augmentation depuis 2010. Cela a eu pour effet de déclencher des pannes dans certains pays et de conduire à une hausse historique des prix ainsi que des émissions de CO₂. Ainsi, en 2022, l'AIE («World Energy Outlook 2022») indique que la hausse des prix du gaz et du charbon est responsable de 90% de l'augmentation des coûts moyens de production de l'électricité dans le monde.

Les considérations énergétiques dans les systèmes de production ne sont pas récentes. En effet, en 2016, (GAHM et al. 2016) a dressé un classification de 87 articles publiés entre 1990 et 2015 sur les problèmes d'ordonnancement ayant pour objectif l'efficacité énergétique - «Energy-Efficient Scheduling (EES)».

En physique, l'énergie est la capacité d'un système à produire un travail : déplacement, éclairage, chauffage, ... D'une manière générale, l'Efficacité Energétique est le rapport entre l'énergie utilisée par un système (dite énergie "utile") et l'énergie consommée par celui-ci. L'énergie «gaspillée» donne lieu à un sous-produit qui peut être utilisé (par exemple, la chaleur générée par les lampes). Si cette énergie n'est pas capturée, elle se disperse simplement.

L'Efficacité Energétique permet de décrire la consommation d'énergie d'un système par rapport au service rendu. (FYSIKOPOULOS, PASTRAS et al. 2014) s'intéressent à cette notion dans les Systèmes de Production Manufacturiers et la définissent selon quatre niveaux : processus, machine, ligne ou usine. Les auteurs mettent en avant la nécessité de s'intéresser non seulement au processus de fabrication et à la machine mais également aux éléments périphériques comme les ressources de transport. Ainsi, l'efficacité énergétique d'une ligne ou d'une usine dépend fortement de la planification et de l'ordonnancement de la production. (FYSIKOPOULOS, ANAGNOSTAKIS et al. 2012) ont montré également qu'en modélisant à l'avance une chaîne de montage et en incluant des considérations énergétiques, on peut éventuellement économiser de l'énergie et des coûts.

Plus récemment, l'Efficacité Energétique est associée à la production d'énergie renouvelable. (RENNA et MATERI 2021) listent 98 articles publiés en 15 ans et montrent que les systèmes de production historiques (Machines parallèles, Flow-Shop, Job-Shop, RMS, ...) aussi bien que les lignes d'assemblage peuvent être étudiés dans un but d'économie d'énergie et de mise en oeuvre de sources d'énergie renouvelables. Les auteurs soulignent cependant que seulement 12% des articles analysés portent sur la mise en oeuvre de sources d'énergie renouvelables.

L'Efficacité Energétique des Systèmes de Production Flexibles peut être étudiée selon deux directions :

- la **conception du système** avec des problématiques de dimensionnement des ressources de production et des ressources de transport, leur agencement prenant en compte les possibilités de coopération avec les opérateurs ainsi que la conception d'un réseau de transport, en intégrant la production et la consommation énergétique.
- le **pilotage du système** avec des problématiques de planification, d'ordonnancement et d'équilibrage tout en intégrant des sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie photovoltaïque, l'énergie éolienne, etc.

Pour ces problèmes, l'objectif serait la recherche d'un compromis entre les critères historiques (coût, temps, ...) et les critères utilisant l'énergie produite et consommée.

D'un point de vue plus «logistique», les changements des modes de consommation avec le développement du commerce en ligne via le B to C, le C to C et l'économie circulaire induisent une nouvelle logistique et de nouveaux modes de livraison qui ont un impact non négligeable sur les coûts et sur les émissions de GES. Il devient nécessaire d'imaginer et de concevoir des systèmes de distribution économes en énergie ayant un faible impact environnemental. Pour répondre à cela, les leviers sont la multi-modalité, la mutualisation des ressources de transport, les approches collaboratives, les entrepôts urbains ou éphémères, la livraison du dernier kilomètre. L'utilisation de nouveaux types de véhicules (robots autonomes tels que ceux développés par Nuro, drone de livraison expérimenté par Amazon) peut être envisagée.

5.3 Métaheuristiques hybrides

Les métaheuristiques sont des méthodes simples et rapides à mettre en oeuvre qui ont montré leur potentiel pour résoudre des problèmes complexes présentant plusieurs leviers de décision.

En particulier, l'hybridation des métaheuristiques permet d'envisager des **approches par décomposition**. Il me paraît ainsi pertinent de poursuivre principalement dans deux directions :

- utiliser la programmation linéaire ou la programmation par contraintes pour la résolution d'un ou de plusieurs sous-problèmes.
- continuer à développer l'algorithme «split». Initialement développé pour des problèmes de tournées de véhicules, cette approche a été étendue à plusieurs problèmes d'équilibrage de ligne d'assemblage.

Nous envisageons également l'approche inverse dans laquelle la métaheuristique serait utilisée par la programmation linéaire pour restreindre son espace de recherche (démarrage à chaud, ajout de contraintes par exemple). Des travaux dans ce sens ont été initiés dans le cadre d'une collaboration avec la société Inoprod (post-doctorat de Youssouf Hadhbi) pour l'ordonnancement non préemptif de tâches dans des machines parallèles non reliées avec un seul régleur et des temps de montage dépendant de la séquence.

L'intégration de l'énergie dans les problématiques d'ordonnancement ou d'équilibrage sous-entend bien souvent la recherche d'un compromis entre des critères qui peuvent se révéler contradictoires. Il devient alors nécessaire de se tourner vers des **approches bi-critères** (voire multi-critères). Dans ce contexte, l'utilisation de métaheuristiques à population permettrait de construire un ensemble de solutions à présenter aux décideurs.

5.4 Quelques problématiques

De nombreuses problématiques pourraient être listées autour de la conception et du pilotage de systèmes de production de biens et de services flexibles et durables. Dans cette partie, trois problématiques d'actualité sont mises en contexte et présentées.

5.4.1 Conception et pilotage d'une usine ultra-flexible

Ces travaux s'intègrent dans le laboratoire commun Factolab issu d'une association entre le LabEx IMobS³ et le groupe **Michelin**. Ce laboratoire public-privé dédié à l'industrie du futur regroupe 5 laboratoires clermontois dont le LIMOS.

Un des chantiers porte sur la conception d'une Usine Ultra-Flexible qui devrait prendre forme dans une dizaine d'années. Cette Usine Ultra-Flexible disposera de plusieurs centaines de postes de charges flexibles qui seront alimentés par une flotte d'AGV. Le nombre de postes de charge et leur position dans l'usine sont supposés connus.

Les produits suivent une gamme de production précise. Deux parties, que nous appellerons le corps et la tête, sont d'abord confectionnées, avant d'être assemblées et de subir une opération de finition. Deux types d'AGV seront utilisés.

Ainsi, pour la réalisation d'un produit, deux ordres de fabrication sont lancés en parallèle, et deux AGV sont mobilisés l'un pour le corps et l'autre pour la tête. Chaque AGV réalise un parcours de poste en poste en suivant la gamme du produit qu'il transporte. Le premier transportera la tête sur les postes de confection (des têtes) puis sur un poste d'assemblage avant d'être libéré. Le second transportera un corps pendant tout le processus de fabrication, depuis la confection jusqu'à la finition. En fonction du type du produit transporté, un réglage de l'AGV peut être nécessaire avant son utilisation.

L'objectif de l'étude est de concevoir le réseau de transport et de dimensionner la flotte de chaque type d'AGV, de manière à satisfaire le plan de production annuel. Deux scénarii sont envisagés :

- les AGV continuent de servir de support aux produits pendant les opérations de production : les AGV restent donc bloqués avec le produit pendant toute la durée de l'opération,

- les AGV déposent les produits sur le poste de charge : les AGV sont alors libérés et peuvent aller transporter un autre produit.

L'usine telle qu'elle est imaginée a une structure de job-shop flexible avec transport avec 400 postes de charge tous types confondus.

A court terme, les axes de travail se situent au niveau de la conception du système :

- dimensionner la flotte d'AGV ainsi que les voies de circulation (sens et nombre) et les parkings intermédiaires,
- proposer des règles de gestion des AGV prenant en compte l'état complet du système,
- identifier les goulets d'étranglement.

Ces travaux devraient être menés en collaboration avec Hector Gatt en post-doctorant (début au 1er juin 2023).

A moyen terme, nous envisageons également de nous intéresser au plan de production journalier ce qui permettrait d'agir sur la séquence des ordres de fabrication et de fluidifier la production.

5.4.2 Conception de réseaux et d'optimisation de tournées autour de la mise en place de circuits courts alimentaires de proximité

Un circuit court et de proximité est un mode de commercialisation reposant sur deux caractéristiques : un intermédiaire maximum entre le producteur et le consommateur final et une proximité géographique entre le producteur et le consommateur final (70 ou 80 kilomètres selon les sources). Le Pôle Interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations Economiques (PIPAME 2017) définit les circuits courts et de proximité comme un mode de commercialisation «*qui valorise le lien social, la transparence, l'équité dans les échanges, la coopération des acteurs, le maintien ou la création d'emploi et qui préserve l'environnement*».

A destination des particuliers, de nombreuses mises en œuvre existent :

- la vente directe du producteur au consommateur,
- les Associations pour le Maintien d'une Agriculture Paysanne (AMAP),
- les points de vente collectifs - magasin de producteurs,
- les plateformes collaboratives qui mettent en relation des producteurs et des consommateurs : LaRucheQuiDitOui.fr, LeCourtCircuit.fr, ...

Les Circuits Courts Alimentaires de Proximité (CCAP) sont de plus en plus plébiscités et bénéficient d'a priori favorables sur le plan social en participant à la pérennisation de l'activité socio-économique grâce à des relations producteurs/consommateurs et villes/campagnes renforcées. Du point de vue environnemental, la question de la logistique et du transport est devenue cruciale dans la mesure où les émissions des gaz à effet de serre peuvent devenir importantes. Selon (VAILLANT et al. 2017) , *la durabilité des CCAP soulève en effet des débats, en particulier quant à la durabilité environnementale de leurs organisations logistiques et de transport. A titre d'exemple, les travaux du Commissariat Général au Développement Durable (2013) montrent que la livraison en utilitaire par un producteur peut émettre 100 fois plus de GES qu'une livraison avec un camion de 40 tonnes.*

La loi EGalim promulguée en 2018, complétée en 2021 par la loi Climat et Résilience, prévoit plusieurs mesures très ambitieuses pour améliorer la qualité des repas servis par la restauration collective, avec notamment l'objectif d'un taux d'approvisionnement de 50% de produits durables et de qualité, dont 20% de produits issus de l'agriculture biologique. Dans de nombreuses régions, la restauration collective se tourne vers les producteurs locaux et vers les CCAP. En 2017, 5% de l'approvisionnement se faisait en circuits courts (PIPAME 2017) .

L'approvisionnement de la restauration collective par des agriculteurs repose encore aujourd'hui sur des pratiques très informelles et à la marge. Plusieurs freins sont observés : mise en relation difficile, ruptures de l'offre, manque d'attractivité, manque de visibilité des producteurs, coûts, ... Les Pouvoirs Publics nationaux se sont emparés du sujet en mettant en place un certain nombre d'outils tel que les PAT (Projets Alimentaires Territoriaux) dont l'objectif est de faire travailler à l'échelle d'un territoire les acteurs concernés par l'alimentation, la santé, l'environnement et le développement local.

Dans ce contexte, la problématique qui nous intéresse repose sur la proposition de nouvelles organisations de transport en intégrant la mutualisation de ressources telle que l'utilisation de ressources de transport dédiées à d'autres types de flux, la mise en place de plateformes, l'organisation de tournées avec des points de transfert où la marchandise peut être soit stockée un temps limité soit transférée directement d'un véhicule à un autre. Cette problématique a été initiée avec la thèse de Arnauld Tuyaba et fait l'objet d'une **collaboration avec la chambre d'agriculture de l'Allier et le Conseil Départemental de l'Allier**.

Le système peut être décrit par un ensemble de sommets composés de nœuds de producteurs et de nœuds de clients. Les clients émettent des demandes pour un ou plusieurs types de produits. Deux hypothèses sont envisagées :

- chaque demande est faite auprès d'un producteur (affectation client / producteur connue),
- les demandes sont faites globalement (affectation client / producteur à déterminer).

Les producteurs disposent d'un véhicule de type et de capacité connus. La flotte de véhicules ainsi définie est hétérogène. Un producteur prend son véhicule pour livrer ses produits et ceux d'autres producteurs ou bien confie ses produits à un autre producteur qui réalise la livraison. Il s'agit de déterminer les tournées des producteurs minimisant la distance parcourue tout en maintenant un équilibre entre les tournées.

Les axes de travail portent sur la proposition d'organisations inspirées de problèmes de tournées de véhicules telles que Multi-Depot VRP (MDVRP), Pick-up and Delivery, Multi-Depot DARP.

5.4.3 Prise en compte de la consommation énergétique dans l'équilibrage des lignes d'assemblage

Dans la continuité de nos travaux sur les problèmes d'équilibrage de lignes d'assemblage, nous souhaitons prendre en compte des aspects énergétiques dans la résolution de ce problème et plus particulièrement la minimisation du pic de consommation énergétique.

En complément des données du SALBP, chaque opération est caractérisée par la quantité d'énergie consommée par unité de temps. A chaque instant, la quantité totale d'énergie consommée par la ligne d'assemblage est la somme des énergies consommées par toutes les opérations en cours de réalisation. Le pic de consommation énergétique est défini par la plus grande quantité totale d'énergie consommée.

En dehors des deux problèmes de base présents dans les problèmes d'équilibrage standards que sont l'affectation des opérations sur les postes et le séquençement des opérations sur chaque poste s'ajoute l'ordonnancement des opérations. Il peut en effet être judicieux de laisser des temps morts entre deux opérations afin de minimiser le pic de consommation.

Ce travail a été initié lors du stage de Master 2 d'Arnauld Tuyaba et poursuivi en collaboration avec Matthieu Py, ATER à l'IUT Clermont Auvergne. Deux méthodes de résolution ont été proposées : une mathématique (génération d'un voisin et résolution du problème d'ordonnancement par la résolution d'un modèle mathématique) et une méthode exacte (approche SAT).

A court terme, nous envisageons d'améliorer la matheuristique proposée en proposant un autre système de voisinage et de proposer une autre matheuristiques en étendant l'algorithme «split».

A moyen terme, il serait intéressant de modéliser de manière plus réaliste la consommation énergétique celle-ci n'étant généralement pas linéaire (LV et al. 2016).

5.5 A suivre...

A suivre au gré des opportunités, collaborations, sollicitations...

Références

- BRAUNER, N. et al. (2005). « Ordonnancements dans les systèmes flexibles de production ». In : *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 39.8, p. 925-964.
- FYSIKOPOULOS, A., D. ANAGNOSTAKIS, K. SALONITIS et G. CHRYSSOLOURIS (2012). « An Empirical Study of the Energy Consumption in Automotive Assembly ». In : *Procedia CIRP* 3. 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2012, p. 477-482.
- FYSIKOPOULOS, A., G. PASTRAS, T. ALEXOPOULOS et G. CHRYSSOLOURIS (2014). « On a generalized approach to manufacturing energy efficiency ». In : *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 73.9-12, p. 1437-1452.
- GAHM, C., F. DENZ, M. DIRR et A. TUMA (2016). « Energy-efficient scheduling in manufacturing companies : A review and research framework ». In : *European Journal of Operational Research* 248.3, p. 744-757. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221715006505>.
- LV, J., R. TANG, S. JIA et Y. LIU (2016). « Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools ». In : *Journal of Cleaner Production* 112, p. 3864-3874. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615009294>.
- PIPAME (2017). *Prospective. Economie sociale et solidaire : les circuits courts alimentaires*. Ministère de la transition écologique et solidaire.
- VAILLANT, L., A. GONÇALVES, G. RATON et C. BLANQUART (2017). « Transport et logistique des circuits courts alimentaires de proximité : la diversité des trajectoires d'innovation ». In : *Innovations* 54.3.
- LIAQAIT, R. A., S. HAMID, S. S. WARSI et A. KHALID (2021). « A Critical Analysis of Job Shop Scheduling in Context of Industry 4.0 ». In : *Sustainability* 13.14.
- MAKRIS, S. (2021). *Cooperating Robots for Flexible Manufacturing*. Springer, Cham.
- RENNA, P. et S. MATERI (2021). « A Literature Review of Energy Efficiency and Sustainability in Manufacturing Systems ». In : *Applied Sciences* 11.16.