



**HAL**  
open science

# Modélisation et optimisation des problèmes continus et discrets, du dimensionnement à l'ordonnancement

Christophe Sauvey

► **To cite this version:**

Christophe Sauvey. Modélisation et optimisation des problèmes continus et discrets, du dimensionnement à l'ordonnancement. Recherche opérationnelle [math.OC]. Université de Lorraine, 2021. tel-03104210

**HAL Id: tel-03104210**

**<https://hal.science/tel-03104210v1>**

Submitted on 8 Jan 2021

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

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



UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE

Ecole Doctorale IAEM Lorraine



Laboratoire de Génie Informatique  
de Production et de Maintenance

Modélisation et optimisation des problèmes continus et  
discrets, du dimensionnement à l'ordonnancement

## Habilitation à Diriger des Recherches

Université de Lorraine

Mention Automatique, Traitement du Signal et des Images, Génie Informatique

Présentée et soutenue publiquement le 5 janvier 2021 par :

**Christophe SAUVEY**

Maître de Conférences

Docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble

### Composition du jury

Rapporteurs :	Pr. Stéphane Dauzère-Pérès Pr. Ameer Soukhal Pr. Farouk Yalaoui	Ecole des Mines de Saint-Etienne Université de Tours Université de Technologie de Troyes
Examineurs :	Pr. Patrick Charpentier Pr. Christelle Guéret Pr. Mireille Jacomino Pr. Nathalie Sauer	Université de Lorraine Université d'Angers Institut National Polytechnique de Grenoble Université de Lorraine



## Table des Matières

Remerciements .....	5
Introduction générale.....	7
Partie I : Curriculum Vitae Détaillé.....	11
1.1 Etat civil.....	12
1.2 Expériences professionnelles.....	12
1.3 Titres Universitaires .....	12
1.4 Encadrement doctoral et scientifique .....	13
1.5 Publications .....	16
1.6 Rayonnement.....	17
1.7 Responsabilités scientifiques.....	18
1.8 Activités d'enseignement .....	21
1.9 Activités d'intérêt collectif.....	25
Partie II : Synthèse scientifique.....	27
Introduction .....	29
Chapitre 1 : Problèmes de type Flowshop.....	31
1.1 Introduction .....	31
1.2 Les contraintes de blocage.....	32
1.3 Contribution méthodologique et verrous scientifiques.....	35
1.4 Flowshop Classique.....	36
1.5 Flowshop Hybride .....	43
1.6 Flowshop Hybride avec machines parallèles non identiques .....	54
1.7 Conclusion et contribution scientifique.....	55
Chapitre 2 : Problèmes de type Jobshop.....	57
2.1 Introduction .....	57
2.2 Contribution méthodologique et verrous scientifiques.....	58
2.3 Jobshop Classique.....	58
2.4 Jobshop Hybride .....	65
2.5 Conclusion et contribution scientifique.....	67
Chapitre 3 : Problèmes variés de modélisation et d'optimisation des systèmes de production et de logistique .....	69
3.1 Introduction et verrous scientifiques .....	69

3.2	Applications hospitalières.....	70
3.3	Ré-ordonnement.....	77
3.4	Applications au financement des immobilisations industrielles.....	80
3.5	Optimisation des performances pour le développement durable.....	82
3.6	Modélisation et optimisation des problèmes de localisation.....	84
3.7	Conclusion et contribution scientifique.....	86
Chapitre 4 : Perspectives pour la modélisation et l'optimisation.....		89
4.1	Introduction .....	89
4.2	Modélisation et optimisation du financement des systèmes.....	89
4.3	Modélisation et optimisation sur des modèles mixtes.....	91
4.4	Modélisation et optimisation pour les problèmes d'ordonnement.....	97
4.5	Conclusion.....	100
Chapitre 5 : Conclusion et Perspectives .....		101
Références .....		103
Annexe : Liste des publications classées.....		119

## Remerciements

Le Professeur Patrick Charpentier est la première personne qui a relu ce manuscrit. Il a donc « essuyé les plâtres ». Je le remercie beaucoup pour le temps qu'il a passé à me relire, ainsi que pour la gentillesse avec laquelle il m'a donné ses précieux conseils pour améliorer ce document. J'ai hâte de faire sa connaissance pour lui témoigner ma reconnaissance, sans ordinateur entre nous.

J'ai rencontré le Professeur Stéphane Dauzère-Péres assez tôt après mes débuts en recherche opérationnelle, et j'ai été impressionné par la gentillesse avec laquelle ce scientifique reconnu m'a considéré d'emblée. Celle-ci m'a donné une confiance en moi dont je mesurais encore les effets quand il a accepté de devenir rapporteur de ce mémoire. Depuis la lecture de son rapport, j'ai franchi un cap, je suis littéralement dopé ! Merci pour cette énergie.

Au fil de nos rencontres lors des conférences nationales et internationales, j'avais pu percevoir le Professeur Ameer Soukhal comme quelqu'un de très sérieux dans son travail et agréable lors des échanges informels. Je le remercie pour avoir accepté le travail de rapporteur de ce mémoire, ainsi que pour les échanges chaleureux que nous avons pu avoir à cette occasion.

J'ai l'honneur de connaître le Professeur Farouk Yalaoui depuis plusieurs années. Ses interventions scientifiques sont pointues et pertinentes, marquées d'une réflexion personnelle sur les phénomènes qui influencent notre quotidien que j'ai plaisir et intérêt à écouter. Je le remercie pour avoir accepté d'être rapporteur pour ce mémoire. La chaleur et la convivialité de nos échanges me fait espérer chaque nouvelle opportunité de nous revoir avec plaisir.

Au cours de ces dernières années, j'ai été amené à rencontrer le Professeur Christelle Guéret, sur les sujets dont il est question dans ce mémoire. Ses interventions, enrichissantes et constructives, sont toujours empreintes d'une bienveillance exemplaire. J'ai été touché par l'enthousiasme avec lequel elle a répondu à mon invitation à participer à mon jury. Celui-ci est une source d'énergie à laquelle il m'est agréable, et quelquefois utile, de puiser.

Le Professeur Mireille Jacomino est la première personne qui m'a enseigné la recherche opérationnelle lors de mes études en école d'ingénieur. Elle m'a fait immédiatement comprendre l'intérêt de ces méthodes pour trouver des solutions pratiques à des problèmes difficiles et concrets. Grâce à elle, j'ai pu provoquer plus facilement ma chance de rejoindre Nathalie, et finalement progresser aujourd'hui dans ma vie professionnelle. Je suis fier de lui montrer que son travail a porté ses fruits.

Nathalie est une femme de grande qualité, humaine, raisonnable, professionnelle et à l'écoute de tous. Sa mesure sait doser mes excès, toujours aux moments opportuns. Mes excès d'enthousiasme s'apaisent dans son calme sourire, et mes excès de doutes se noient dans sa sérénité bienveillante. Je me félicite chaque jour d'avoir accepté la proposition qu'elle m'a faite de rejoindre son équipe de recherche. Je sais d'où je viens, et je mesure la valeur d'aller travailler avec le sourire aux lèvres et le cœur léger. Ce bonheur quotidien d'être à ses côtés est une bénédiction.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des collègues que j'ai côtoyés au cours de ma première moitié de vie professionnelle. Je n'ai pas oublié Jean-Louis, pour son apport à ma culture mécanique et thermique, mais d'autres se sont ajoutés à la liste. Norbert occupe une place particulière dans mon cœur, car il m'a littéralement « pris sous son aile » pour m'apprendre avec passion ce métier d'enseignant tant décrié par les faiseurs d'opinion, mais pourtant si essentiel. Mes dix années de travail à tes côtés ont été un plaisir, aussi bien professionnel que personnel, et tu es toujours vivant dans ma pratique quotidienne de ce beau métier.

Mes collègues du département Génie Industriel et Maintenance de l'IUT de Thionville-Yutz m'ont toujours permis de travailler dans des conditions supportables et plutôt agréables, malgré les vents contraires que nous affrontons ensemble depuis une quinzaine d'années. Philippe et Yves sont les premières lignes de cette belle équipe pédagogique à laquelle je suis fier d'appartenir. Je les remercie pour leurs nombreux soutiens au cours de ces années. Quoique l'avenir nous réserve, je n'oublierai jamais le plaisir que j'ai eu à travailler avec vous. J'y ai beaucoup appris.

Mes collègues du laboratoire de Génie Informatique, de Production et Maintenance sont également des personnes que j'ai plaisir à côtoyer. Nathalie évidemment, mais aussi Didier, dont la légendaire bonne humeur communicative résiste à tout, mon ami Jérémie dont la subtilité de l'humour est appréciée de tous, Christel dont j'écris le prénom correctement, Annie la Bretonne, Chantal la retraitée, Aurélie et son Valentin, et les deux Normands du laboratoire, Aimé le Havrais et Minh le Rouennais. Quant à Wajdi, il est si gentil qu'il est non seulement devenu naturellement mon ami, mais aussi celui de Léa !

Nous gagnons tous à garder l'esprit le plus ouvert possible. Nicolas, Alexis, Alan, Pierre, Yves, Jean-Jacques, et sans doute beaucoup d'autres, l'ont bien compris et de mon côté, comme toujours, je fais de mon mieux. J'aurais bien aimé posséder ne serait-ce qu'une petite part de leur talent, leur génie, mais je ne suis que moi. Cette phrase est l'expression de ma reconnaissance et ma solidarité avec des personnalités qui font avancer le monde malgré les oppositions, qu'elles soient éclairées ou non.

Depuis la rédaction de ma thèse de Doctorat, 20 années se sont écoulées. La liste des personnes que j'aimais et qui ne sont plus physiquement présentes s'est allongée. Je remercie chaque jour l'Univers pour la joie de pouvoir profiter de la lumière de la présence de ceux qui me sont le plus chers sur cette Terre. Je continuerai donc à dédier ce mémoire à tous ceux qui, ici ou ailleurs, pensent à moi. La musique de Véronique Sanson m'aidait déjà, et continue de m'accompagner tous les jours. Au cours de ces années, celle d'Elton John est venue s'y ajouter. Merci à vous deux de me faire tant de bien et de m'encourager avec votre talent.

Ma famille est ce qui compte le plus pour moi, depuis toujours et pour toujours. Ma femme et ma fille ont contribué, chacune à sa manière, à m'encourager à rédiger ce mémoire, et je les en remercie du fond du cœur. J'aime énormément Delphine, Catherine, Christèle, Maud, Stéphane et Laurent, ainsi que leurs familles respectives, dont je sais que tous sont en bonne santé et vivent paisiblement. La proximité se définit de plusieurs façons. Papa et Maman sont, sans aucun doute, les deux personnes qui ont le plus inspiré ma vie, par leur soutien et leurs encouragements quotidiens. Je n'arriverai jamais à leur exprimer tout l'amour que je ressens et le tout le bonheur que j'ai de pouvoir profiter de leur présence. Je loue les synchronicités qui nous portent et qui, je l'espère, nous porteront encore jusqu'à la fin des temps.

## Introduction générale

### **De tous temps, l'optimisation a permis à l'humanité d'avancer.**

Aux temps préhistoriques, les hommes essayaient d'optimiser leur temps de parcours lorsqu'ils partaient à la chasse pour nourrir leur famille ou leur tribu. Ils décrivaient des parcours en forme de spirale autour de leur campement, de sorte à chasser sur le territoire le plus vaste possible, tout en restant toujours le plus près possible de leur camp.

De ces temps anciens à nos jours, l'optimisation a changé de visage, mais les enjeux sont restés les mêmes au long de tous ces millénaires : obtenir un résultat maximum en fournissant un minimum d'efforts. Les lois de la nature sont faites selon ce principe. En mécanique, un système se stabilise autour d'une position d'équilibre, qui correspond toujours à un minimum d'énergie. Quel que soit le domaine dans lequel on cherche à appliquer ce principe, l'optimisation est une loi de la nature, à laquelle l'homme a toujours essayé de s'adapter au mieux. C'est ce qui, selon moi, a développé son cerveau.

De nos jours, l'optimisation est partout, aussi bien dans nos vies personnelles que dans nos vies professionnelles, et ses applications sont domestiques aussi bien qu'industrielles. Il n'existe plus de dispositif technique ou d'organisation qui ne soit pas optimisée selon un critère donné.

### **Optimiser quoi ? *La modélisation et l'optimisation s'appliquent à tout.***

Au cours de mes années de recherche, j'ai développé plusieurs modèles, essentiellement analytiques, de systèmes électromécaniques dans un premier temps, puis de systèmes de production et de logistique par la suite, ainsi que différentes méthodes d'optimisation, à chaque fois les plus adaptées possibles aux modèles sur lesquels elles devaient opérer.

### **Des biens et des services :**

Depuis que je suis chercheur, j'ai travaillé sur la modélisation et l'optimisation, sur différents modèles et avec plusieurs méthodes. Le domaine d'application a évolué, du génie électrique vers l'ordonnancement, mais les besoins sont les mêmes. Il s'agit essentiellement de répondre à la question suivante : « que peut-on faire de mieux avec ce dont on dispose ? ».

### ***1997-2007 : 10 années de recherche sur les moteurs à réluctance variable.***

Pendant mes 10 premières années d'activité professionnelle, j'ai travaillé à la modélisation et à l'optimisation en génie électrique, et plus particulièrement sur les moteurs à réluctance variable (MRV). Après un DEA sur l'implantation d'un processus de gestion de tâches dans un système expert, j'ai effectué mes travaux de thèse sur la modélisation pour le dimensionnement des MRV ainsi qu'à leur optimisation pour le compte de la société Radio-Energie (91), mon employeur pendant cette période (Sauvey, 2000). Pendant mon passage au Laboratoire de Micro-électronique de Puissance implanté sur le site de la société ST-Microelectronics à Tours (37), j'ai travaillé sur la modélisation des composants radio-fréquences passifs et conçu des circuits intégrés passifs. Enfin, de septembre 2001 jusqu'à décembre 2007, j'ai contribué, au sein du LGIPM, à la modélisation et l'optimisation de MRV à haute vitesse, en visant des applications d'usinage (200.000 tr/min). Pendant ces années, j'ai acquis une expérience et une expertise dans les domaines de la modélisation pour le dimensionnement, la conception de systèmes électromagnétiques, électromécaniques et électroniques de puissance. Les expériences vécues au fil de ces années m'ont appris à

intégrer, dès le début du processus de conception, les contraintes mécaniques, thermiques, magnétiques, électriques et électroniques du produit développé, mais aussi celles liées à l'application : puissance, couple, rampes de vitesse, point de fonctionnement, etc. Ces activités ont donné lieu à plusieurs publications en revues et en congrès nationaux et internationaux. Même si j'ai opéré un changement de thématique de recherche au 1<sup>er</sup> janvier 2008, je valorise aujourd'hui ces compétences dans mes activités d'enseignement à l'IUT de Thionville-Yutz, où j'ai la responsabilité des enseignements de génie électrique.

***Depuis 2008 : changement thématique vers les problèmes d'ordonnancement et logistique.***

Tous les cinq ans, nos laboratoires sont évalués par l'agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur. A cette occasion, on demande aux équipes de produire, bien sûr un bilan, mais aussi des perspectives pour les cinq années à venir. Les pôles de compétitivité ont été créés en 2004 dans le cadre du lancement d'une nouvelle politique industrielle en France. En décembre 2007, à Metz, toutes les équipes ont dû se positionner par rapport au tout récent pôle de compétitivité « Mécanique-Matériaux-Structure » (devenu Materialia aujourd'hui). C'est à la faveur de ce positionnement, qui a donc aussi concerné chaque chercheur, que j'ai rejoint l'équipe « évaluation des performances des systèmes de production et de logistique », dans laquelle j'ai effectué les travaux présentés dans ce mémoire. Dans ce cadre, je travaille au développement de modèles mathématiques, de méthodes exactes et approchées pour la résolution de problèmes discrets. Ceux-ci s'appliquent, bien sûr, aux problèmes d'ordonnancement et de logistique, mais ce nouveau point de départ m'a ouvert des horizons infinis, qui vont de l'organisation optimale d'un bloc opératoire à l'optimisation de modèles de production durable en passant par la localisation de sites production.

**Les problèmes :**

L'objectif d'un problème d'ordonnancement consiste à rechercher le meilleur enchaînement d'un nombre donné de tâches sur un nombre donné de ressources, afin de minimiser un critère (coût ou retard par exemple). Ce meilleur enchaînement doit être décrit de façon précise, par exemple en donnant les dates de début de chaque opération sur chaque ressource. Une telle définition correspondant à un enchaînement possible de toutes les tâches sur toutes les ressources est appelée ordonnancement. Les critères à optimiser sont variés et dépendent de l'application particulière visée. Le plus connu est la date de fin de toutes les opérations sur toutes les machines, appelé makespan ou  $C_{max}$ . D'autres critères, comme la minimisation des retards pour chaque job, de la somme de tous les retards, du temps de traitement de chaque job, peuvent également être rencontrés. En fait, le critère d'optimisation dépend du problème auquel on s'attaque et des objectifs industriels à atteindre.

Il existe trois grands types de problèmes d'atelier : flowshop, jobshop et openshop. Au cours de nos travaux, nous nous sommes intéressés aux problèmes de type flowshop et jobshop, que nous présentons en introduction des chapitres qui leurs sont respectivement consacrés.

**Les méthodes de résolution :**

On peut choisir d'utiliser les mêmes méthodes pour résoudre ces différents problèmes. Cependant, certaines sont plus adaptées à la résolution d'un problème qu'à un autre, car elles sont souvent développées pour la résolution d'un problème particulier. Les méthodes de résolution sont nombreuses et variées, et dépendent des besoins, de la taille du problème et du temps dont dispose l'utilisateur, tant pour les développer que pour les utiliser. Il existe deux grandes classes de méthodes de résolution, les méthodes exactes et les méthodes approchées.

Les méthodes exactes garantissent à leur utilisateur une résolution optimale. Elles sont basées sur la connaissance du modèle mathématique du problème. Plusieurs méthodes exactes sont connues. On trouve parmi celles-ci la programmation dynamique et les méthodes de recherche arborescentes, comme les procédures par séparation et évaluation ou à base de propagation de contraintes. On trouve dans la référence suivante une excellente présentation des méthodes exactes, avec des exemples et des illustrations (Portmann et Oulamara, 2006). La programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) est l'une des plus utilisées. Elle ne demande en effet à son utilisateur aucun investissement dans la programmation informatique d'une méthode de résolution, même s'il doit toutefois définir un modèle efficace, car des logiciels performants sont disponibles sur le marché. Dans le cadre de nos travaux, nous avons développé des modèles linéaires en nombres entiers, mais également programmé un algorithme par séparation et évaluation pour la résolution exacte des problèmes d'ordonnancement de petites tailles.

Les méthodes approchées de résolution sont les plus répandues dans le monde industriel. En effet, les problèmes rencontrés sont bien souvent de tailles telles que les méthodes exactes mettent trop longtemps pour trouver la solution optimale. Il devient alors utile de développer soit des heuristiques, soit des méta-heuristiques, pour trouver les meilleures solutions possibles dans un temps limité.

L'intérêt de développer une heuristique spécifique à un problème est l'intégration directe de l'intelligence relative au problème considéré dans la recherche d'une solution. Pour schématiser, on peut dire qu'il existe plusieurs façons de résoudre un problème. Chacune de ces façons, si elle est programmée, donne lieu à une heuristique. Chaque heuristique correspond donc à l'implantation d'une façon intelligente, on l'espère toujours, de réfléchir sur le problème considéré. Ces méthodes peuvent être coûteuses à développer, car il faut consacrer du temps à réfléchir sur le problème, puis du temps pour développer un algorithme de résolution, et enfin du temps pour le programmer et corriger les éventuelles erreurs. Mais, si on a souvent et beaucoup de problèmes du même type à résoudre, l'investissement d'une entreprise dans de telles méthodes s'avère rapidement rentable.

Les méta-heuristiques, quant à elles, sont des méthodes qui possèdent leur propre intelligence pour l'exploration d'un espace de solutions multidimensionnel. Cette intelligence est celle qui a été mise en œuvre par le concepteur du programme, dans ses choix en termes de codage des solutions potentielles, les choix de voisinages qu'il envisage d'explorer en fonction des situations, les critères d'arrêt qu'il a choisis. Pour schématiser, une méta-heuristique contient l'intelligence de son concepteur, sur sa façon d'utiliser des outils connus pour explorer un espace à la recherche d'une bonne solution. Ainsi, pour chaque problème qu'un utilisateur est amené à considérer, s'il est capable d'encoder un ensemble de solutions viables et d'écrire une fonction d'évaluation qui donne comme résultat, pour chacun des éléments de cet ensemble, le critère à optimiser, alors il peut appliquer une méta-heuristique à ce problème.

Les méta-heuristiques jouissent de performances enviables et souvent supérieures aux heuristiques en termes de précision. Elles sont plus coûteuses en temps de calcul, mais aussi réglables. Les réglages sont souvent perçus comme un problème, puisqu'ils représentent un travail supplémentaire. Cependant, ils peuvent aussi être perçus comme un avantage. En effet, il est possible, avec une méta-heuristique, de dégrader la qualité d'une solution attendue afin de l'obtenir dans des délais plus brefs, alors que cette manipulation est souvent impossible avec des heuristiques.

## **Le fil conducteur : la modélisation mathématique et les méthodes d'optimisation.**

Depuis le début de mes travaux de thèse jusqu'à aujourd'hui, et pour probablement longtemps encore, j'ai développé des modèles pour les problèmes auxquels j'ai été confronté. L'expérience que j'ai acquise m'a permis de bien comprendre que tous les modèles ne se valent pas, et qu'il faut écrire son modèle en fonction de ce que l'on souhaite en tirer. Si, de plus, on souhaite associer à ce modèle une méthode d'optimisation, il est là encore opportun d'y avoir réfléchi préalablement. Ces quelques réflexions semblent évidentes à la lecture, mais lorsque l'on est pris dans l'enthousiasme de la modélisation « pour la première fois », et c'est toujours la première fois sur un nouveau problème, on peut perdre un temps précieux par défaut de réflexion.

Depuis janvier 2008, mes travaux de recherche se sont orientés vers l'optimisation combinatoire, principalement l'application de méthodes exactes et approchées pour l'évaluation des performances et l'ordonnancement des systèmes de production de biens ou de services. Au cours de ces travaux, je me suis notamment intéressé aux problèmes d'ordonnancement de type flowshop et jobshop, classiques ou hybrides, dont les machines ou les étages sont soumis à des contraintes de blocage mixtes. J'ai eu l'occasion de contribuer à la modélisation du bloc opératoire d'un hôpital, ainsi que du retour sur investissement dans de nouvelles immobilisations industrielles. J'ai également pu résoudre plusieurs problèmes d'optimisation, sur des modèles variés, qu'ils soient miens ou non.

Ce mémoire contient deux parties. La première contient mon curriculum vitae détaillé. On peut y trouver les informations relatives à mon expérience professionnelle dans le métier d'enseignant-chercheur, en termes d'encadrement doctoral et scientifique, de responsabilités scientifiques, d'activités pédagogiques ou réalisées dans l'intérêt de ma communauté d'enseignement ou de recherche.

La seconde partie de ce mémoire est consacrée à la synthèse scientifique de mes travaux de recherche. Les verrous scientifiques posés par les problèmes d'ordonnancement, de type flowshop et jobshop, avec contraintes de blocage mixtes, auxquels je me suis attaqué, sont d'abord présentés. Ensuite, les problématiques de la modélisation et l'optimisation des systèmes de production sont abordées. Enfin, une analyse de l'expérience accumulée au cours de cette première partie de ma carrière professionnelle permet de proposer des perspectives quant à ces deux problématiques, aussi bien en matière d'ordonnancement que pour la prise en compte des modèles mixtes dans un environnement d'optimisation auto-adaptatif dont les limites restent à définir. Une nouvelle thématique permettant de croiser les axes financier et logistique est également proposée.

## Partie I : Curriculum Vitae Détaillé

A partir de l'obtention de mon diplôme d'ingénieur et de mon DEA en 1997, la première moitié de ma vie d'enseignant-chercheur peut se résumer sur la figure ci-dessous (figure 1). On peut voir, de bas en haut, les postes que j'ai occupés, mes activités principales en termes de recherche, puis en termes d'enseignement, et enfin en termes d'implication personnelle pour l'intérêt collectif.

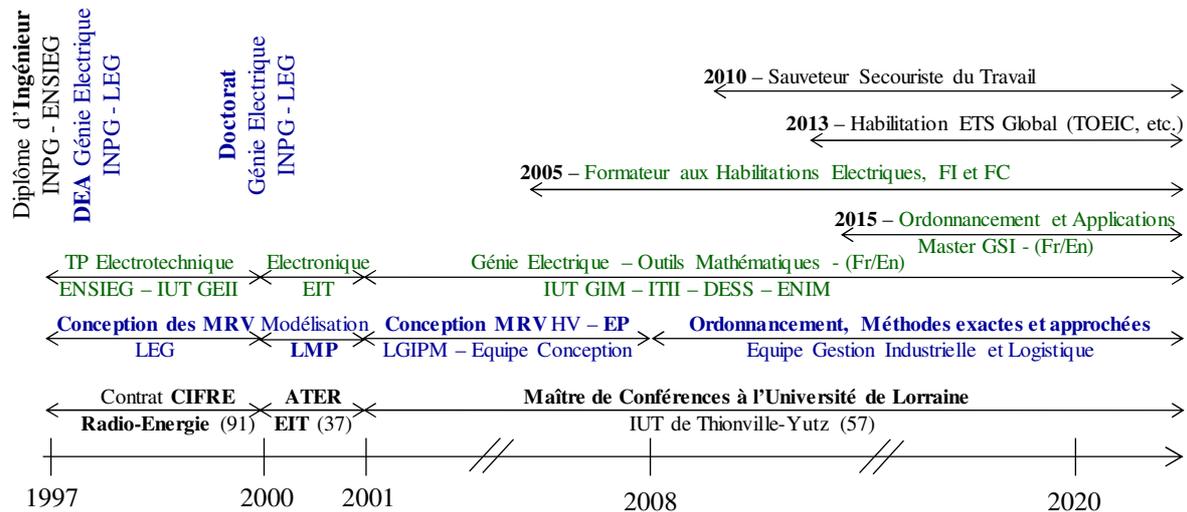


Figure 1. La première moitié de ma vie d'enseignant chercheur.

J'ai obtenu mon diplôme d'ingénieur ainsi que mon diplôme d'études approfondies, en génie électrique, à l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble (ENSIEG-INPG), en 1997. J'ai ensuite préparé mon doctorat sur la modélisation et le dimensionnement des moteurs à réluctance variable au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble (LEG-INPG), en contrat CIFRE avec la société Radio-Energie dont le siège social était à Marcoussis (91), que j'ai obtenu en septembre 2000. Après une année passée à l'école d'ingénieurs de Tours en qualité d'ATER, j'ai été recruté comme maître de conférences à l'université de Metz, au Laboratoire de Génie Industriel, Production et Mécanique, dans l'équipe conception d'éléments de machines et actionneurs. J'y ai travaillé au développement d'un prototype de moteur à réluctance variable à très haute vitesse et de son environnement (électromagnétisme, électronique de puissance, capteurs, tenue mécanique, problèmes couplés) pour des applications à l'usinage à haute vitesse. En janvier 2008, à la faveur de l'évaluation quinquennale, j'ai effectué une conversion thématique. J'ai d'abord particulièrement concentré mes efforts sur les problèmes d'ordonnancement, mais j'ai diversifié le champ d'application de mes travaux depuis quelques années. Dans la suite, je détaille mon cursus, mes activités et mes productions scientifiques

## 1.1 Etat civil

Né le 18 novembre 1974 à Rouen (76) - Nationalité française – Marié, 1 enfant.

### Coordonnées professionnelles :

LGIPM / UFR MIM  
3, Rue Augustin Fresnel – BP 45112  
57073 METZ CEDEX 03  
Tel : +33. 3.72.74.79.66  
christophe.sauvey@univ-lorraine.fr

### Coordonnées personnelles :

13, Rue de Belchamps  
57000 METZ  
Tel : +33. 3.87.56.03.71

## 1.2 Expériences professionnelles

### Depuis 09/01 : Maître de Conférences à l'Université de Lorraine

Enseignement : Génie électrique, Outils mathématiques. IUT de Thionville-Yutz.

Laboratoire : Laboratoire de Génie Informatique, de Production et de Maintenance.

Thèmes (2000-2007) : Conception des moteurs à réluctance variable, Capteurs, Electronique de puissance, Modélisation électromagnétique, Dimensionnement.

Thèmes depuis 2008 : Optimisation combinatoire, Modélisation mathématique, Méthodes d'optimisation, Méthodes exactes, Ordonnancement.

### 09/00 – 08/01 : ATER à l'Ecole d'Ingénieurs de Tours (37).

Laboratoire : Laboratoire de Microélectronique de Puissance (LMP).

Recherche : Modélisation des composants radiofréquences, Conception de circuits intégrés passifs, Explications physiques des différences modèle/mesures. Proposition de solutions pour l'amélioration du facteur de qualité d'inductances.

### 10/97 – 09/00 : Groupe RADIO ENERGIE, Marcoussis (91). Ingénieur en contrat CIFRE.

Recherche : Modélisation Analytique et Dimensionnement de Systèmes Electriques.

## 1.3 Titres Universitaires

### 2000 – Doctorat

Titre : Contribution méthodologique à la modélisation pour le dimensionnement de moteurs à réluctance variable.

Mots-clés : Moteur à reluctance variable (MRV), Dimensionnement, **Modélisation**, Boîtes de calcul, Conception sous contraintes, Réseaux de réluctances, Modularité, **Optimisation**.

Laboratoire : Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble (LEG - INPG).

Spécialité : Génie électrique.

Encadrants : Jean Bigeon, Frédéric Wurtz.

Soutenance : 8 Septembre 2000.

Jury : A. Foggia, C. Marchand, J.P. Masson, F. Wurtz, J. Bigeon, P. Le Lan.

Résumé : Ce travail s'intéresse à la modélisation pour le dimensionnement de moteurs à reluctance variable. Dans une première partie, on donne notre approche du problème de dimensionnement, puis on définit les trois grands types de modèles que le concepteur en électrotechnique sera amené à rencontrer. Enfin, on présente différentes méthodes de conception de moteurs à

reluctance variable qui ont été mises en œuvre. Dans une seconde partie, nous présentons une méthodologie permettant d'intégrer des modèles semi analytiques dans un processus d'optimisation de type gradient : les boîtes de calcul. Nous présentons celles que nous avons créées, puis un exemple de leur application au dimensionnement d'un moteur à reluctance variable de type classique. On s'intéresse dans la troisième partie à la modélisation en vue du dimensionnement d'un moteur à reluctance variable à motifs. Après une présentation de la structure d'un tel moteur, on en présente un modèle analytique, puis un modèle numérique, modulaires. Enfin, on s'appuie sur la complémentarité qui existe entre ces deux modèles pour proposer une méthode de dimensionnement.

### **1997 – DEA**

Formation : DEA de Génie électrique.  
 Titre : Implantation d'un processus de gestion de tâches dans un système expert.  
 Mots-clés : Système expert, stratégie guidée par les faits (architecture de type blackboard), représentation objet des données, création et gestion de tâches instanciées.  
 Laboratoire : Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble (LEG - INPG).  
 Encadrant : Laurent Gerbaud.  
 Soutenance : Septembre 1997. Jury composé de : L. Gerbaud, S. Gentil, J.L. Coulomb.  
 Résumé : Un modèle de gestion des liens entre les tâches et les données a été établi dans un système expert de conception des entraînements électromécaniques. Au cours de ce travail, nous avons proposé une structuration objet permettant de créer et de gérer l'état des tâches instanciées, c'est-à-dire des actions élaborées à partir des tâches sur les données. Grâce à cela, lors de chaque cycle de contrôle, on n'instancie que les tâches utiles de même que l'on ne gère que les tâches instanciées pour lesquelles on a relevé un changement de valeur d'un des paramètres. Ainsi, sur le nombre élevé de tâches (1000) et de données (>2000), on a gagné en rapidité par rapport à la solution classiquement utilisée dans les architectures de type blackboard, qui consiste à balayer systématiquement toutes les tâches et toutes les tâches instanciées.

### **1997 – Diplôme d'ingénieur en génie électrique ENSIEG :**

Université : Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble (ENSIEG -INPG).  
 Spécialité : Modélisation – Conception – Simulation.

## **1.4 Encadrement doctoral et scientifique**

### **Encadrement de thèses soutenues (2 thèses ; TE : 100%) :**

**Wajdi Trabelsi**, Thèse de Doctorat de l'Université Paul Verlaine de Metz, début : Octobre 2009, soutenue le 14 novembre 2012.  
 Sujet : Résolution des problèmes de type Flowshop et Flowshop Hybrides avec contraintes de blocages variables entre machines successives.  
 Encadrement : Nathalie Sauer (50%, directrice), Christophe Sauvey (50%, co-directeur).  
 Financement : Bourse du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.  
 Publications : 1 revue (C&OR), 4 conférences internationales (IESM 2011, IFAC World Congrès 2011, INCOM 2012, MIM'13).

Devenir : Professeur Associé à l'ICN-Business School de Nancy, après une année d'ATER à l'Université de Lorraine, et poursuit ses activités de recherche dans notre équipe.

**Afef Bouguerra**, Thèse de Doctorat de l'Université de Lorraine, début : Octobre 2013, soutenue le 7 juillet 2017.

Sujet : Optimisation et aide à la décision pour la programmation des opérations électives et urgentes.

Encadrement : Nathalie Sauer (50%, directrice), Christophe Sauvey (50%, co-directeur).

Financement : Financement Région Lorraine (50%) + Contrat du laboratoire avec la Communauté d'Agglomération Sarreguemines Confluence (50%).

Publications : 1 revue (Journal of Engineering Research), 3 conférences (ROADEF'15, INCOM'15, CODIT'16).

Devenir : Analyste logistique/consultante en chaîne d'approvisionnement et logistique, chez Conseil 2.0, à Montréal.

### **Encadrement de thèse en cours (1 thèse ; TE : 50%).**

**Ayoub Tighazoui**, Thèse de Doctorat de l'Université de Lorraine, débutée en octobre 2018, soutenance prévue en juillet 2021.

Sujet : Ré-ordonnancement des systèmes de production flexibles avec contraintes de blocage mixtes soumis à des aléas de commandes ou de production.

Encadrement : Nathalie Sauer (50%, directrice), Christophe Sauvey (50%, co-directeur).

Financement : Financement Région Grand-Est (50%) + Contrat du laboratoire avec la Communauté d'Agglomération Sarreguemines Confluence (50%).

Publications : 1 revue (IJAMT), 2 conférences (CODIT'20, SHeIC'20), 2 soumissions en revue (JMS, C&OR).

### **Encadrement de Master 2 (17 Masters ; TE : 850%).**

**Hocine Taourirt** (2003). DEA PROTEE (Génie Electrique), mars 2003 - septembre 2003

Encadrement : Christophe Sauvey (50%), Gabriel Abba (50%).

Sujet : Modélisation analytique et optimisation d'un moteur à réluctance variable pour l'usinage grande vitesse.

**Mohand O. Hamiti** (2003). DEA PROTEE, mars 2003 - septembre 2003.

Encadrement : Christophe Sauvey (50%), Gabriel Abba (50%).

Sujet : Modélisation des pertes dans les moteurs à réluctance variable pour l'usinage à grande vitesse.

**Alvaro Sanchez Gallego** (2005). DEA PROTEE, mars 2005 - septembre 2005.

Encadrement : Christophe Sauvey (50%), Gabriel Abba (50%).

Sujet : Développement d'un modèle modulaire d'ensembles électromagnétiques pour l'usinage grande vitesse.

**Emil-Gabriel Munteanu** (2007). Master recherche, janvier 2007 - juillet 2007.

Encadrement : Christophe Sauvey (50%), Gabriel Abba (50%).

Sujet : Modélisation analytique des transferts thermiques dans les moteurs électriques à très grande vitesse.

**Wajdi Trabelsi** (2009). Master recherche, janvier 2009 - juin 2009.

Encadrement : Christophe Sauvey (50%), Nathalie Sauer (50%).

Sujet : Développement d'heuristiques pour la résolution des problèmes d'ordonnancement.

**Julio Lozada Sanchez** (2010). Master recherche, janvier 2010 - juin 2010.

Encadrement : Christophe Sauvey (50%), Nathalie Sauer (50%).

Sujet : Développement d'heuristiques pour la résolution du problème de flowshop hybride avec contrainte de blocage spécifique.

**Mina Hannane** (2011). Master recherche, janvier 2011 - juin 2011.

Encadrement : Christophe Sauvey (50%), Nathalie Sauer (50%).

Sujet : Résolution de problèmes d'ordonnancement de type JS à l'aide d'heuristiques.

**Najib Affroukh** (2013). Master recherche, janvier 2013 - juin 2013.

Encadrement : Christophe Sauvey (50%), Nathalie Sauer (50%).

Sujet : Développement de méthodes exactes pour la résolution de problèmes d'ordonnancement de type flowshop avec ou sans blocage.

**Diana Petreanu** (2015). Master recherche, février 2015 - juillet 2015.

Encadrement : Christophe Sauvey (50%), Nathalie Sauer (50%).

Sujet : Résolution de problèmes d'ordonnancement de types jobshops classiques et hybrides avec blocages mixtes.

**Ali Gasmi** (2015). Master recherche, mars 2015 - octobre 2015.

Encadrement : Christophe Sauvey (50%), Nathalie Sauer (50%).

Sujet : Logistique Hospitalière : Gestion des urgences dans l'ordonnancement du bloc opératoire.

**Mohamed Thabet** (2015). Master recherche, mars 2015 - octobre 2015.

Encadrement : Christophe Sauvey (50%), Nathalie Sauer (50%).

Sujet : Développement d'un modèle de simulation à événements discrets d'une ligne d'assemblage électronique pour l'estimation du Makespan.

**Khaled Zoueri** (2015). Master recherche, mars 2015 - octobre 2015.

Encadrement : Christophe Sauvey (50%), Nathalie Sauer (50%).

Sujet : Développement d'heuristiques pour la résolution de problèmes d'ordonnancement de type flow shop hybride avec ou sans blocage.

**Mohamed Latrous** (2016). Master recherche, janvier 2016 - juin 2016.

Encadrement : Christophe Sauvey (50%), Nathalie Sauer (50%).

Sujet : Prise en compte de la chirurgie ambulatoire dans la gestion du bloc opératoire.

**Jean-Aurélien Petga** (2016). Master recherche, janvier 2016 - juin 2016.

Encadrement : Christophe Sauvey (50%), Wajdi Trabelsi (50%).

Sujet : Aide à la décision d'investissement sur de nouveaux moyens de production en lien avec les contraintes d'ordonnancement.

**Adriana Pacheco** (2017). Master recherche, janvier 2017 - juin 2017.

Encadrement : Christophe Sauvey (50%), Nathalie Sauer (50%).

Sujet : Développement de modèles exacts et d'heuristiques pour l'ordonnancement de flow-shops hybrides avec machines parallèles non-identiques et contraintes de blocage.

**Nidhal Seghir** (2017). Master recherche, mars 2017 - novembre 2017.

Encadrement : Christophe Sauvey (50%), Nathalie Sauer (50%).

Sujet : Ordonnancement des systèmes de production Flow Shop hybride avec des machines non identiques.

**Khouloud Nahali Gueusmi** (2019). Master recherche, janvier 2019 - juin 2019.

Encadrement : Christophe Sauvey (50%), Nathalie Sauer (50%).

Sujet : The development of some heuristics in order to solve the re-scheduling problems.

## 1.5 Publications

Les deux tableaux suivants synthétisent mes publications ainsi que l'essentiel de mes travaux de recherche. Le Tableau 1 récapitule mon activité scientifique pendant la période dédiée au génie électrique. Les publications jusqu'à 2001 concernent les activités relatives à ma thèse, alors que celles de 2002 à 2007 concernent les activités relatives au développement du moteur à réluctance variable à haute vitesse.

Année	Conférences Internationales	Conférences Nationales	Reuves	Encadrement Master ou DEA	Soutenance Thèse
2007		1		1	
2006	2		1		
2005	1	4		1	
2004	2		1		
2003	1	1		2	
2002	1				
2001			1		
2000 et avant	4	1	1	2	
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	

**Tableau 1. Récapitulatif de la production scientifique et des encadrements en génie électrique.**

Le Tableau 2 dresse le bilan de mes activités scientifiques dans l'équipe de gestion industrielle et logistique dans le domaine de la recherche opérationnelle depuis 2008.

Année	Conférences Internationales	Conférences Nationales	Reuves	Encadrement Master ou DEA	Soutenance Thèse
2020	2		5		
2019	2		1	1	
2018			1		
2017	1		1	2	1
2016	1			2	
2015	2	1		4	
2014					
2013	1	1		1	
2012	2		2		1
2011	2	1		1	
2010	2			1	
2009	2	1			
2008			1		
<b>Total</b>	<b>17</b>	<b>4</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>2</b>

**Tableau 2. Récapitulatif de la production scientifique en recherche opérationnelle.**

La liste complète de mes publications est donnée dans l'annexe.

## 1.6 Rayonnement

### Membre de comité de programme et organisation de conférences

- Organisateur de la 5ème journée du groupe de travail UGR-GreatRoad (01/07/2010 à Metz).
- Membre du Comité Scientifique de 4 conférences internationales (IManEE depuis 2016, ICONS depuis 2017, INTELLI depuis 2017, SHeIC depuis 2020).
- Membre du Comité d'Organisation de 4 conférences (HLR 2004, MOSIM 2010 (IEEE, IFAC), ROADEF 2017, IESM 2017).

### Expertise scientifique

- Coéditeur invité d'un numéro spécial « Optimal Decisions and Risk Assessment in Sustainable Supply Chains », pour la revue Sustainability (31/03/2020).
- Relecteur régulier pour plusieurs journaux à audience internationale : CAIE, COR, EJOR, IJPR, JIM, IEEE-TASE, IEEE-TII, Mathematics, Sustainability.
- Relecteur de plusieurs papiers dans des conférences nationales ou internationales : ROADEF, INCOM, CIE, ECC, MOSIM, IESM, IManEE, ICONS, INTELLI.
- Président de 4 séances lors des conférences internationales suivantes : MOSIM'2010 (Systems Control), INCOM'2012 (Job Shop Scheduling), MCO'2015 (Operational Research and Applications) et IESM'2017 (Machine Scheduling Problems).

### Jurys

- Participation au jury de Thèse de M. Ali Gorine (le 13/09/2011).

### Vulgarisation

- Création d'une conférence musicale avec François Narboni, Compositeur et Directeur du Conservatoire de Thionville : « Le son : musique et sciences ».
- Création de deux maquettes ludo-éducatives :
  - Résolution des problèmes d'ordonnancement.
  - Résolution du problème de voyageur de commerce.
- Création de posters et autres médias sur mes activités d'enseignement et de recherche.
- Participation active à l'organisation de 3 journées à l'IUT :
  - Journée de la maintenance (mai 2002),
  - Journée des huiles (mai 2003)
  - Exposé de Gérard Gay sur la compatibilité électromagnétique et les phénomènes harmoniques (mai 2005).Ces journées ont réuni à chaque fois à l'IUT une trentaine d'industriels qui ont pu assister à des présentations de haute qualité, à la fois scientifique et pragmatique.

### Collaborations internationales

Suite à l'organisation de la conférence IESM'2017 avec les collègues de la **HTW Sarr à Sarrebrück**, j'ai initié avec le **Pr. Melo** (HTW Saar) et le **Dr. Correia** (Universidade NOVA de Lisboa) une collaboration scientifique internationale sur les problèmes d'installation de moyens de production multi-périodes, sous contraintes de demande variable. Cette

collaboration a débuté en novembre 2017, et a déjà donné lieu à une présentation lors de la conférence EWGLA en juin 2019 à Bruxelles, ainsi qu'à la publication d'un article dans le journal *Computers and Industrial Engineering*.

Depuis 2019, je suis invité par la **HTW Saar** à leur « semaine européenne », au cours de laquelle tous les contacts internationaux de l'école sont réunis, au bénéfice des étudiants, pour les renseigner et leur ouvrir l'esprit sur les perspectives de mobilité qui leur sont offertes. A cette occasion, les enseignants-chercheurs sont aussi invités à donner un cours, en anglais ou en allemand, aux étudiants de l'école. C'est dans ce cadre que j'interviens sur le module *Vehicle Routing Problems*.

J'ai présenté mes activités de recherche, devant les collègues enseignants, chercheurs, ainsi que les étudiants de l'Université Internationale de Logistique et Transport de Wrocław, le 01/12/2015.

J'ai également été invité à présenter mes travaux de recherche, lors du 2<sup>ème</sup> colloque international « Logistique and Supply Chain Management », organisé par l'**Université Centrale de Tunis**, le 12/10/2015. J'ai été réinvité les 14 et 15 novembre 2017, pour leur 4<sup>ème</sup> colloque « Logistics and Supply Chain Management 2017 ». J'ai présenté, cette fois-ci, l'état d'avancement des travaux menés dans le cadre du projet visant la résolution de flowshop hybrides avec machines parallèles non-identiques.

## **1.7 Responsabilités scientifiques**

### **Coordination d'un projet de recherche**

- **Responsable scientifique et coordinateur du projet d'intérêt régional « Ordonnancement des systèmes de production flexibles avec des machines différentes sous contraintes de blocages mixtes » (2017).**

Budget : 28,6 k€ sur un an.

Financier : Région Lorraine

Participants : Sauer, N., Sauvey, C., Trabelsi W.

Ce projet vise à réduire les coûts et les délais grâce à l'utilisation optimale des moyens de production disponibles, et ainsi maîtriser les impacts énergétiques et environnementaux liés à la production. L'équipe de recherche travaillant sur ce projet, composée de 3 enseignants chercheurs permanents a pris en compte des nouvelles contraintes industrielles dans l'optimisation de l'ordonnancement de systèmes de production flexibles avec blocage, à savoir les machines parallèles non-identiques, uniformes et quelconques. Nous avons proposé des méthodes d'optimisation et des outils d'aide à la décision pour répondre à ces problématiques.

### **Participation aux projets de recherche**

- **Projet « méthanisation : Aide au pilotage, optimisation, prévention des dysfonctionnements, traitement du signal ».**

Budget : pas encore défini.

Participants : Zasadzinski, M., Richard, E., Sauvey, C., Zemouche, A., Delattre, C., Di Pillo, O., Souley Ali, H., Pacaud, S., Mathieu, P.

Partenaire académique : ENSAIA, CRAN.

Ce projet vise à développer des méthodes de prévention des dysfonctionnements pour l'aide au pilotage de la plateforme de méthanisation de l'Université de Lorraine sur le site de la Bouzule (54). En particulier, les méthodes de recherche opérationnelle pourront être

appliquées pour améliorer les rendements de cette unité de méthanisation, par un choix approprié des associations de déchets entrants.

- **Projet « Stratégies de pilotage intelligentes d'une ligne de production avec prise en compte de contraintes industrielles » (2014-2017)**

Budget : 52,3 k€ sur 3 ans

Financier : Conseil Général de la Moselle (57).

Participants : Bistorin, O., Dellagi, S., Hajej, Z., Rezg, N., Sauer, N., Sauvey, C., Schutz, J.

Partenaire académique : Université de Pitesti (Manufacturing and Industrial Management Department).

Partenaires industriels : DACIA (Roumanie), Arcelor Mittal Global R&D (France).

De nos jours, afin de satisfaire la demande de plus en plus variable des clients tout en respectant les délais de fabrication, il devient nécessaire d'élaborer de nouvelles stratégies de pilotage tenant compte simultanément de contraintes telles que la variabilité de la demande, la taille du lot de production, l'aspect multi-produits, les méthodes de gestion de la production, les méthodes d'alimentation des postes de travail en respectant les normes d'ergonomie et les politiques de maintenance à adopter. Au cours de ce projet, nous avons trouvé un compromis entre l'utilisation des lots de petite taille (qui assurent une meilleure réactivité à la demande mais diminuent la capacité des lignes en augmentant les coûts de setup) et les lots de grande taille. Nous avons également étudié l'influence des méthodes de contrôle de gestion de la production sur les indicateurs de performance.

- **Projet Formation/Recherche « Logistique Hospitalière » (2013-2017 et 2018-2022).**

Budget : 115 k€ sur 4 ans.

Participants : Anciaux, D., Rezg, N., Roy, D., Sauer, N., Sauvey, C., Schutz, J.

Partenaire académique : IUT de Moselle-Est.

Partenaire industriel : Hôpital Robert Pax.

Co-financeur institutionnel : Communauté d'Agglomération Sarreguemines Confluence.

Depuis quelques années, les systèmes hospitaliers ont entamé une mutation dans leur fonctionnement afin de tenter de mieux maîtriser leurs processus et ainsi offrir des services de meilleure qualité aux patients. Cette mutation s'est initiée en collaboration avec les praticiens afin de préserver la qualité des soins médicaux et la valeur ajoutée de ces systèmes. Nous avons proposé d'adapter les méthodes et outils que nous maîtrisons sur les systèmes manufacturiers aux systèmes hospitaliers en intégrant bien sûr les spécificités inhérentes à ce métier particulier. Les différents travaux scientifiques engagés permettent désormais de disposer d'une « boîte à outils » à disposition des gestionnaires hospitaliers afin de contribuer à l'amélioration des systèmes hospitaliers.

- **Programme pluri-formations (PPF) « Modélisation, optimisation et simulation numérique pour l'aide à la décision dans les systèmes de transport, manufacturiers et hospitaliers » (2009-2012).**

Budget : 40 k€ sur 4 ans

Participants : Rezg, N., Roy, D., Sauer, N., Sauvey, C., Sava, A., Schutz, J.

Partenaire académique : LITA (Laboratoire d'Informatique Théorique et Appliquée) - Metz

Dans l'objectif de développer des outils d'aide à la décision efficaces et sûrs pour commander les systèmes à événements discrets, le LGIPM et le LITA ont proposé ce projet pluri-formation sur 4 ans. Il a permis la mise en place d'approches hybrides combinant de nouvelles méthodes et de nouveaux outils de la théorie des systèmes à

événements discrets, de l'optimisation globale et de la recherche opérationnelle afin de résoudre des problèmes de contrôle de management et d'optimisation dans les domaines des systèmes manufacturiers, de transport et hospitaliers.

### **Responsabilités et fonctions dans les instances locales**

- **Responsable de l'axe « Recherche Opérationnelle »** de la plateforme technique de l'IUT de Thionville Yutz depuis 2015. Cette plateforme regroupe les trois axes de recherches des enseignants chercheurs de l'IUT, volontaires pour y participer. Les deux autres axes sont « Biologie Environnementale » et « Energies Renouvelables ». Je rédige notamment le compte rendu annuel d'activité de recherche, pour cet axe.
- Je participe activement et régulièrement aux conseils de laboratoire, ainsi qu'aux réunions concernant la plateforme technique. De plus, lorsqu'il m'est impossible de siéger, je n'oublie jamais de donner une procuration pour les votes.

## 1.8 Activités d'enseignement

Après une année d'ATER passée à l'Ecole d'Ingénieurs de Tours (2000-2001) où j'ai enseigné principalement l'électronique analogique et numérique, je suis en poste au département Génie Industriel et Maintenance de l'IUT de Thionville-Yutz depuis septembre 2001, où je dispense principalement des enseignements du génie électrique et des outils mathématiques.

### Détails des enseignements

En plus des activités d'enseignement auxquelles je suis naturellement affecté, je me suis engagé dans tous les types de formation (départements voisins, formation continue, inter et intra entreprises, alternance, CNAM, catalogue de formations de l'UL), tous les types de publics (enfants, adolescents, étudiants, adultes), tous les niveaux (éveil, vulgarisation scientifique, cours du soir), en deux langues (français et anglais, mais je travaille l'allemand (B1 validé) et l'espagnol), de nombreuses matières (ordonnancement et applications, tournées de véhicules, initiation à la technologie, stratégie et approche économique de l'externalisation, statistiques et probabilités appliquées à la maintenance), avec tous les modes (en binôme avec un collègue (en 2005), outils numériques (ENT, depuis longtemps), salle PC mobile, bibliothèque (depuis 2017), téléphone portable (depuis 2019).

Je suis toujours prêt à innover, au service des étudiants. J'ai transformé mes enseignements, suite aux formations que j'ai suivies, sur Moodle il y a plusieurs années, puis sur « Rendre son cours interactif à l'aide d'outils numériques ».

J'enseigne en langue anglaise aux étudiants de DUT pour le génie électrique et les outils mathématiques, mais aussi à tous les étudiants devant lesquels j'interviens.

Je suis intervenu dans le master SPIM/GSI (Sciences Pour l'Ingénieur et sciences des Matériaux, Spécialité Génie des Systèmes Industriels) délocalisé à Tunis, Agadir (Maroc) et Wroclaw (Pologne) où j'ai enseigné l'ordonnancement et ses applications. Le module remplit la semaine, pour un volume de 24h à 35h. Particulièrement, à Wroclaw, j'ai assuré la totalité du module *Scheduling and Applications* à des étudiants non-francophones, dans un pays non francophone.

Mes activités de recherche m'amènent à me déplacer régulièrement vers l'Allemagne. J'ai passé et obtenu en 2018 le Goethe Zertifikat pour le niveau B1 en allemand. Je n'ai encore jamais préparé de cours en langue allemande, mais j'ai préparé le cours *Vehicle Routing Problem* à la HTW Saar de Sarrebrück, en collaboration avec le Pr. Melo, sur la base d'un cours en allemand.

J'enseigne en électrotechnique, et notamment en travaux pratiques. Au début des séances de travaux pratiques, je ne manque jamais d'alerter mes étudiants **au sujet de la sécurité**, avec une écoute qui se fait malheureusement de plus en plus distraite au fur et à mesure des années.

Le nombre d'heures équivalent TD que j'ai faites depuis 2014 sont résumées ci-dessous :

	2014/2015	2015/2016	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020
<b>HeqTD</b>	<b>285</b>	<b>353</b>	<b>350</b>	<b>255</b>	<b>235</b>	<b>210</b>
<b>Niveau L</b>	240	278	305	210	235	210
<b>Niveau M</b>	45	75	45	45	0	0

En termes d'intitulés, niveaux et nombre d'heures, on peut trouver un résumé de mes activités d'enseignement au cours des 20 dernières années dans le Tableau 3.

FI, FC, FP : Formation Initiale, Continue ou Professionnelle

FR : Français / EN : English

Matière	Niveau	Type de Formation	CM	TD	TP	Langues	Effectif moyen
<b>Electrotechnique, Electronique, Automatique</b>							
ETENP1 - Circuits et transformateurs	LM	FI	15	15	15	FR/EN	40
ETENP2 - Moteurs électriques	LM	FI	15	15	15	FR/EN	40
ETENP3 - Electronique de puissance	LM	FI	15	15	15	FR/EN	40
MTS - Maintenance, Technologie et Sécurité	L	FI	3	12	15	FR	40
CNAM - Systèmes électrotechniques (ELT 104)	M	FC	24	24		FR	40
Habilitations électriques	LM	FI/FP		20	12	FR	24
Habilitations électriques		<b>Moselis - Thionville (57)</b>		16	16	FR	15
Sensibilisation aux risques d'origine électrique	L	FI	4	4		FR	15
ENA - Electronique analogique	LM	FI	15	15	15	FR	50
ENN - Electronique numérique	LM	FI	15	15	15	FR	50
Initiation à l'automatique continue	L	FI	6	12	12	FR	24
AUTO - Modélisation des systèmes asservis linéaires	L	FI	9	9	12	FR	40
AUTO - Performances des systèmes bouclés	L	FI	9	9	12	FR	40
Initiation à la technologie (Département TC)	L	FI	9	9	12	FR	90
DESS - Instrumentation pour l'automatique	D	FI	12	12		FR	24
Sécurité et développement durable	L	FI	3	6	6	FR	40
<b>Outils Mathématiques</b>							
Statistiques et Probabilités	L	FI	15	15		FR/EN	40
Statistique inférentielle	L	FI	15	15		FR/EN	40
Statistiques et Probabilités appliquées à la maintenance		<b>PSA - Trémercy (57)</b>	12	12		FR	12
Equations, fonctions, trigonométrie et complexes	L	FI	15	15		FR/EN	40
Espaces vectoriels, fonctions linéaires, matrices	L	FI	15	15		FR/EN	40
Outils pour l'ingénieur : Laplace et Fourier	L	FI	15	15		FR/EN	40
<b>Basés sur mes compétences en recherche</b>							
Ordonnancement et applications	M	FI	15	20		FR/EN	40
Stratégie et approche économique: externalisation	M	FI	10	5		FR	40
Vehicle Routing Problem (HTW - Sarrebrück (Allemagne))	M	Semaine Internationale	2			EN	40

**Tableau 3. Présentation des activités d'enseignement.**

## Création d'enseignements

Au cours de ma carrière, j'ai créé les enseignements suivants :

- Electrotechnique et Electronique de puissance (CM, TD et TP) en DUT GIM. J'ai créé ce cours en 2001, à ma prise de poste. J'en assure encore aujourd'hui la responsabilité. Celui-ci comprend les 3 modules suivants : 1- Electromagnétisme, Transformateurs, et mesures de puissance ; 2- Machines électriques en AC et DC ; 3- Electronique de Puissance.
- Outils mathématiques (CM et TD), depuis 2005. J'ai également créé l'ensemble des cours d'outils mathématiques qu'il m'est arrivé d'enseigner depuis 2005 au département GIM. J'ai parcouru l'ensemble de la palette des outils mathématiques enseignés dans ce département depuis une quinzaine d'années, au fil des besoins pédagogiques.
- Stratégie et approche économique de l'externalisation appliquée à l'Hospitalisation à domicile (CM), de 2013 jusqu'à 2018, en M2 SPIM/GSI parcours Systèmes Hospitaliers. J'ai créé ce cours dédié à l'hospitalisation à domicile, illustrant quelques aspects décisionnels stratégiques en milieu hospitalier, en lien avec mes activités de recherche (Doctorat d' Afef Bouguerra).

- Sécurité et Développement Durable (CM, TD et TP), depuis 2014. Dans le cadre du nouveau PPN du DUT GIM, j'ai créé un cours sur l'énergie éolienne. Ce cours présente les aspects technologique et économique du procédé de récupération de l'énergie éolienne, et donne quelques méthodes de prédétermination de l'énergie productible à partir d'une étude sur un site.

### **Responsabilités et administration en enseignement**

- J'ai assuré la *direction des études du département Génie Industriel et Maintenance*, de 2006 à 2007 (Nombre d'étudiants moyen : 40 ; Nombre d'enseignants :7 ; Nombre de vacataires :15). Durant cette période, j'ai accompli l'ensemble des tâches dévolues à ce poste : préparation et ajustement des emplois du temps, gestion des absences, des projets tuteurés et des stages, gestion des notes et préparation des commissions pédagogiques de fins de semestres, suivi pédagogique avec entretiens individuels et personnalisés pour les étudiants concernés, gestion des dossiers de poursuites d'études. Je n'ai assuré cette responsabilité que pendant une année et demi, car suite à un désaccord important avec le directeur de l'IUT, l'équipe de direction du département a démissionné.
- J'ai été *responsable d'une Licence Professionnelle Production Industrielle Développement de la Démarche d'Innovation*, adossée au département, de 2011 à 2013 (Nombre d'étudiants visé : 24 ; Nombre d'enseignants :7 ; Nombre de vacataires :15). Pendant chacune de ces 2 années, cette licence n'a pas pu ouvrir, faute d'un nombre d'étudiants suffisant et conformément aux recommandations d'ouverture des formations par l'Université. Cependant, même si elle n'a pas ouvert sur le site de Thionville-Yutz, j'ai réalisé tout le travail préparatoire à son ouverture, principalement pour ce qui est de la recherche d'intervenants compétents dans une matière qui n'est pas la mienne, et dans laquelle je n'avais, au départ, strictement aucun contact. J'ai alors énormément apprécié l'aide efficace d'Elise Marcandella, mon homologue à l'IUT d'Epinal.
- Je suis *responsable pédagogique des modules* d'enseignement d'électrotechnique et électronique de puissance à l'IUT (ETENP 1-2-3). A ce titre, je veille à l'actualisation et/ou la réorientation des programmes associés lorsque cela est utile, en coordination avec les comités de programmes, auxquels j'assiste en fonction des besoins, pour la création de chaque nouveau PPN (Programme Pédagogique National). De même, j'assure la coordination avec les chargés de TD et/ou de TP pour assurer la continuité pédagogique de l'enseignement de ces matières et le meilleur transfert de connaissances possible aux étudiants.
- Je suis *responsable des relations entre le département GIM et la bibliothèque universitaire* depuis 2007. Je suis notamment responsable du budget de commande de livres, et donc de l'arbitrage des commandes proposées par mes collègues. Au fil de ces années, grâce à des commandes successives, guidées par une politique de long terme, nous avons réuni une collection d'ouvrages pour l'ingénieur parmi les plus complètes et utiles.
- J'ai siégé au *conseil d'IUT* de 2007 à 2012 et de 2014 à 2016.
- J'ai été *membre des jurys de recrutement* d'un PRAG (n°0771) en génie électrique à l'IUT de Thionville-Yutz (2011) et d'un technicien à l'Université de Metz (2004).

### **Encadrement de projets, stages, VAE**

A chaque fois que c'est nécessaire, j'encadre les étudiants pour leurs projets tuteurés, ainsi que pour leurs stages en entreprise dans le cadre du DUT Génie Industriel et Maintenance. En moyenne, j'encadre environ 6 étudiants par an.

J'ai accompagné un étudiant qui préparait un dossier de VAE jusqu'au diplôme de Licence Professionnelle en Procédés de Contrôle Non Destructifs (1 étudiant sur 3 ans).

J'ai également encadré un stagiaire ingénieur pendant ses 3 années de cursus à l'ITII, avec des réunions trimestrielles dans son entreprise et les participations aux soutenances et jurys.

Au laboratoire, il m'arrive de recevoir et d'encadrer des étudiants du CESI (une autre école d'ingénieurs par alternance) pour un stage obligatoire de 5 semaines que les étudiants doivent impérativement effectuer dans un laboratoire de recherche.

### **Jurys**

Je préside les jurys de VAE pour l'obtention des diplômes préparés au département GIM, ainsi que les jurys de BAC et de BTS pour lesquels je suis désigné.

Je participe aux jurys de master recherche SPIM/GSI, aux jurys d'ingénieurs ITII, de 2012 à 2016, de projets tuteurés et de stages de l'IUT Thionville Yutz.

## **1.9 Activités d'intérêt collectif**

### **Habilitations**

Je suis habilité par la société ETS Global depuis 2013 pour faire passer les certifications que propose cette entreprise, dont le TOEIC et le TFI (Test de Français International), pour offrir ce service aux étudiants, dans le but de faire fonctionner l'établissement d'enseignement auquel j'appartiens dans les meilleures conditions. J'organise depuis des sessions TOEIC pour les étudiants de l'IUT et du Master SPIM/GSI de Sarreguemines, en fonction des besoins.

Je développe, avec Yves Gillet, depuis 2017, un outil pédagogique permettant aux étudiants d'évaluer les points qu'ils doivent travailler pour améliorer leur score au TOEIC, puis de valider leurs progrès.

Je suis habilité B2-V, BC, BR, H0-V, jusqu'en mai 2022. Je suis habilité par le Président de l'Université de Lorraine pour les responsabilités suivantes en basse tension (0-1000V en tension alternative) : chargé de travaux (B2-V), chargé de consignation (BC) et chargé d'intervention (BR). Je suis également habilité H0-V depuis 2016. Par conséquent, j'assure la formation aux habilitations électriques pour les étudiants de deuxième année du département Génie Industriel et Maintenance.

Je suis Sauveteur Secouriste du Travail (SST) depuis 2010 afin d'améliorer la sécurité de chacun sur notre lieu de travail au jour le jour. Dans la période anxieuse que nous traversons depuis 2015, devenue inédite depuis le 16 mars dernier, les formations de recyclage annuelles dont bénéficient les personnels SST ne sont plus seulement utiles, mais aussi rassurantes. Trois collègues du département GIM avaient d'ailleurs décidé de se former, eux aussi, aux gestes de premiers secours.

### **Vulgarisation et communication auprès du grand public**

J'ai conçu un montage présentant l'ensemble de la formation en génie électrique réalisée au département, en 2005. Ce montage présente notre formation, de façon pratique et claire, lorsque nous recevons des industriels, des classes de lycées ou de collèges et lors des journées portes ouvertes.

J'ai inventé, puis créé et dimensionné une activité ludique, permettant au grand public de se rendre compte de la complexité des problèmes d'ordonnancement sur lesquels j'exerce mes travaux de recherche. J'ai conçu des formes permettant à une personne de voir si elle arrive seule à ordonnancer 6 travaux dans un flowshop à 3 machines (720 possibilités, 1 seule réponse optimale). J'ai également conçu une 7<sup>ème</sup> pièce, dont l'ajout au problème modifie l'ordonnancement optimal (5040 possibilités, et toujours 1 seule réponse optimale mais avec un ordonnancement différent). De même, j'ai créé des maquettes permettant au public de comprendre le problème du voyageur de commerce, en l'expérimentant.

J'étais vice-président de l'association des enseignants du département GIM, qui nous a permis d'inviter plusieurs intervenants de haute qualité scientifique lors des 3 journées à thèmes organisées à l'IUT décrites précédemment.

### **Représentation et promotion**

Parmi les activités d'intérêt collectif, je participe aux différentes actions de représentation :

- Représentation de l'IUT lors des différentes journées, portes ouvertes, sciences en fête, clés de la réussite, forum des métiers, fes'Thi sciences, ...
- Représentation du département GIM auprès des lycéens des terminales scientifiques, technologiques et professionnelles. Je participe régulièrement aussi à des salons (Ori'action, Studyrama), aux forums d'orientation, ...
- Représentation du laboratoire : au salon à l'envers, aux masters délocalisés, ...
- Représentation de mes responsables lors de différentes réunions et manifestations, en fonction de mes disponibilités et capacités (vœux, réunions entreprises-universités, recherche).
- Promotion des sciences auprès du jeune public lorrain. Je reçois 2 ou 3 classes de collèges lors des Fêtes de la science, ainsi que le jeune public (dès 7 ans) de l'association TecTic & Co de Thionville pour des ateliers de découverte scientifique. Je propose 2 ateliers : l'un sur les sons et la musique et l'autre sur l'optimisation des problèmes discrets (recherche opérationnelle « avec les mains »).
- Enfin, je n'oublie jamais de faire la promotion des sciences auprès du jeune public féminin, afin d'encourager les candidatures féminines aux études scientifiques.

## **Partie II : Synthèse scientifique**



## Introduction

Je suis chercheur depuis 1997 et le début de mes travaux de thèse sur la modélisation pour le dimensionnement des moteurs à réluctance variable (Sauvey, 2000). J'ai pu approfondir ce travail jusqu'en 2007 grâce au challenge de faire tourner ces moteurs à très haute vitesse ( $200.000 \text{ tr.min}^{-1}$ ). Les défis proposés étaient au niveau de la conception (couplée mécanique / électromagnétique / thermique) du profil des tôles du rotor, du convertisseur statique, des capteurs (de vitesse, de courant, ...). En janvier 2008, j'ai orienté mes travaux de recherche vers l'optimisation combinatoire ainsi que les méthodes exactes et approchées pour l'évaluation des performances et l'ordonnancement des systèmes de production de biens ou de services. Dans cette seconde partie du mémoire, je présente la synthèse scientifique de mes travaux de recherche, à partir de ma conversion thématique jusqu'à aujourd'hui.

Dans les chapitres 1 et 2, sont présentés les travaux menés respectivement sur les problèmes d'ordonnancement de type flowshop et jobshop, classiques et hybrides, avec des contraintes de blocage mixtes. C'est à la faveur de ces problèmes que j'ai effectué mon changement thématique, et même si l'on m'écrit parfois que les améliorations que l'on peut apporter ne sont qu'« incrémentales », je continue de prendre du plaisir à y travailler. Plus encore, sans rien nier de l'ancienneté de ces problèmes, ni des nombreuses contributions déjà publiées, je revendique que des verrous scientifiques posés par ces problèmes peuvent encore céder.

Le chapitre 3 porte sur la modélisation et l'optimisation des systèmes de production de biens et de services, et l'application des méthodes de la recherche opérationnelle pour la résolution de ces problèmes. Je détaille les travaux menés sur les services hospitaliers, au cours desquels ont été modélisés le bloc opératoire dans le but d'en optimiser le taux de remplissage, puis l'insertion des urgences en perturbant le moins possible un ordonnancement déjà presque optimal. Une autre application présentée concerne le ré-ordonnancement, qui présente de plus en plus d'intérêt avec l'évolution de nos modes de consommation. J'ai également développé un modèle pour le financement de nouvelles immobilisations industrielles, afin d'en connaître la date optimale de retour sur investissement. Parmi les problèmes d'optimisation sur lesquels j'ai également travaillé, je présente l'optimisation des performances des flux industriels pour le développement durable, ainsi que la modélisation et l'optimisation de la localisation de moyens de production.

Enfin, le chapitre 4 présente quelques perspectives de recherche vers lesquelles j'ai l'intention de poursuivre mes efforts dans les années qui viennent. Une première concerne la modélisation et l'optimisation du financement des systèmes de production de biens et de services. Une autre concerne plus spécifiquement le développement de méthodes et de stratégies d'optimisation sur les modèles mixtes. Pour finir, je propose quelques orientations pour mes travaux concernant la recherche opérationnelle et l'ordonnancement.

Le chapitre 5 conclut ce mémoire et donne des perspectives de travail pour les prochaines années, aussi bien en termes de méthodes de modélisation que d'optimisation, mais surtout sur les liens qui existent entre l'une et l'autre.



# Chapitre 1 : Problèmes de type Flowshop

## 1.1 Introduction

Les problèmes de type flowshop sont les plus faciles à comprendre, et généralement ceux sur lesquels on commence à travailler. Le problème d'ordonnancement de type flowshop classique est celui que l'on rencontre dans l'industrie lorsque la production est organisée sous la forme d'une chaîne. C'est historiquement le premier auquel la communauté scientifique s'est attaquée dans les années 1950, suite aux travaux fondateurs de Johnson (1954).

### Définition du problème

Un problème de type flowshop est composé d'un ensemble de  $N$  jobs composés chacun de  $M$  opérations, qui doivent passer sur  $M$  ressources (machines, hommes, ...) dans le même ordre. Les jobs sont donc composés de  $M$  opérations,  $O_i = \{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{iM}\}$ . L'opération  $O_{ik}$  a besoin d'un temps d'exécution  $P_{ik}$  sur la machine  $M_k$ . Une ressource ne peut exécuter qu'une seule opération à la fois et sans interruption. A chaque instant, chaque job ne peut avoir qu'une seule opération en cours de réalisation. Toutes les ressources sont disponibles à l'instant initial. Par ailleurs, la préemption n'est pas autorisée. La figure 1-1 présente le diagramme de Gantt d'un ordonnancement pour un problème de type flowshop avec 4 jobs et 3 machines.

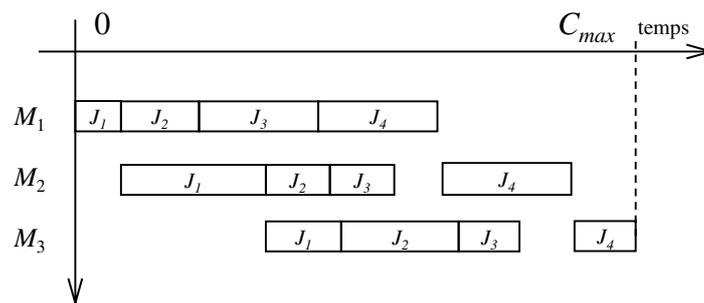


Figure 1-1. Diagramme de Gantt d'un flowshop à 4 jobs et 3 machines.

### Problème de type classique ou hybride ?

Dans le cas des problèmes d'ordonnancement hybrides, la notion d'étage remplace celle de ressource à partir du moment où l'une au moins des ressources du problème existe en plusieurs exemplaires, identiques ou non. Par exemple, sur la figure 1-2, deux exemplaires de la même machine existent sur les étages 1 et 3. Différentes définitions existent, en fonction du fait que la durée d'exécution d'une opération dépend ou non de la ressource de l'étage sur laquelle elle sera finalement exécutée. Dans les travaux de recherche que nous avons effectués sur les problèmes hybrides, nous avons considéré dans un premier temps que les machines étaient identiques sur chaque étage. Le temps d'exécution d'une opération sur un étage est donc, dans ce cas, indépendant de la ressource choisie pour effectuer l'opération.

Cependant, pour définir totalement un ordonnancement valide pour un problème de type hybride, il faut choisir, en même temps que l'ordre dans lequel les tâches seront effectuées sur les étages, la ressource sur laquelle chacune de ces opérations est effectuée. La multiplicité des possibilités d'affectation des tâches aux ressources fait alors exploser la combinatoire et rend la quasi-totalité des problèmes d'ordonnancement hybrides NP-difficiles.

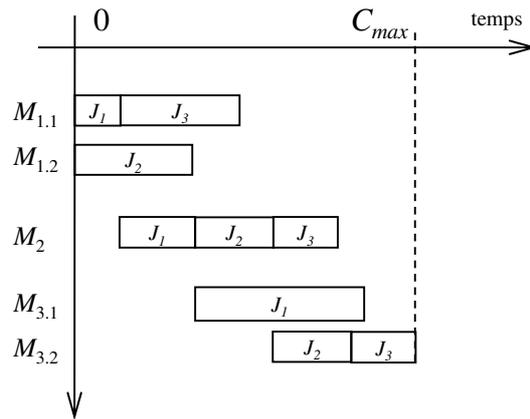


Figure 1-2. Diagramme de Gantt pour un flowshop hybride à 3 jobs et 3 étages.

Après la description des contraintes de blocage auxquelles nous nous sommes intéressés, nous présentons successivement dans ce chapitre les travaux que nous avons réalisés sur les problèmes de type flowshop classique, puis flowshop hybride. Pour chacun de ces problèmes, nous abordons la complexité, les bornes inférieures, les méthodes exactes et approchées.

## 1.2 Les contraintes de blocage

Dans la présentation précédente des problèmes, il est supposé que l'espace de stockage entre ressources successives (ou étages successifs) du système de production est infini. En effet, dès qu'un travail est terminé sur la première ressource d'un flowshop, par exemple, le travail suivant peut être entamé sur cette même ressource. Cette modélisation pose des problèmes quant à sa correspondance avec un cas réel. En effet, les entreprises cherchent à réduire les coûts au maximum, et tendent à réduire leurs stocks ainsi que leurs en-cours de production. Considérer les capacités de stockage comme nulles entre les différents étages d'un système de production nous amène à poser des contraintes de blocage sur nos problèmes. Nous présentons ici celles sur lesquelles nous avons travaillé (Trabelsi et al., 2012), (Miyaba et Nagano, 2019).

**La contrainte de blocage de type *RSb*** (Release when Starting blocking) est la contrainte de blocage la plus classique. Elle se rencontre lorsqu'une ressource reste bloquée par une tâche jusqu'à la fin de l'exécution de son opération et la libération de la ressource utilisée par la tâche pour son opération suivante.

On rencontre ce genre de contrainte de blocage dans les systèmes de production qui stockent les tâches sur les ressources en attendant la libération des ressources suivantes. On peut trouver des exemples de cette contrainte de blocage dans plusieurs applications industrielles, comme les chaînes robotisées des usines de production d'aciers (Hall et al., 1998). La figure 1-3 présente l'exemple d'un flowshop pour lequel on a la contrainte *RSb* entre toutes les machines du problème.

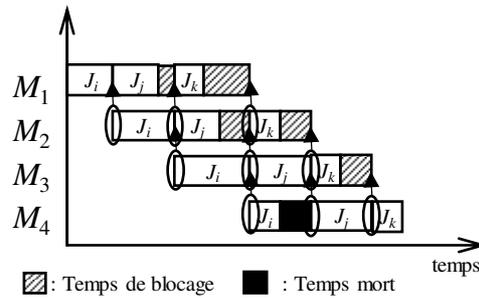


Figure 1-3. Flowshop avec la contrainte de blocage *RSb*.

**La contrainte de blocage de type *RCb*** (Release when Completing blocking) a été introduite par Dauzère-Pérès et al. (2000) sur un problème d’ordonnancement de silos dans le cadre de la gestion de déchets industriels.

On rencontre cette contrainte de blocage lorsqu’une ressource  $j$  doit attendre que la tâche pour laquelle l’opération qu’elle a exécutée débute son opération sur la ressource qui suit la prochaine (ressource  $j+2$ ). Plusieurs exemples ont été utilisés pour illustrer cette contrainte de blocage, comme le traitement de déchets industriels ou la fabrication de pièces métalliques nécessitant un traitement thermique (Martinez, 2005), ou encore la fabrication industrielle de cidre (Trabelsi et al., 2012).

Dans l’exemple qui concerne le traitement de déchets industriels, une compagnie reçoit différents types de déchets industriels et agricoles à traiter, apportés par des camions (Martinez, 2005). Chaque camion doit décharger sa cargaison dans un seul silo. L’ensemble des silos peut être vu comme un étage de système de production hybride. Comme les produits s’écoulent lentement du silo vers le malaxeur, un silo n’est libéré qu’à la fin du traitement sur le malaxeur de l’ensemble de sa contenance. Dans celui qui concerne le traitement thermique de pièces métalliques pour l’industrie aéronautique, les pièces doivent être portées à une température précise dans un ou plusieurs fours qui peuvent être vus comme un étage du système de production hybride. Ces pièces doivent ensuite passer sur une emboutisseuse unique. Un four est ainsi bloqué jusqu’à ce que l’ensemble des pièces qu’il contient soient embouties.

La figure 1-4 présente l’exemple d’un flowshop pour lequel on a la contrainte *RCb* entre toutes les machines du problème.

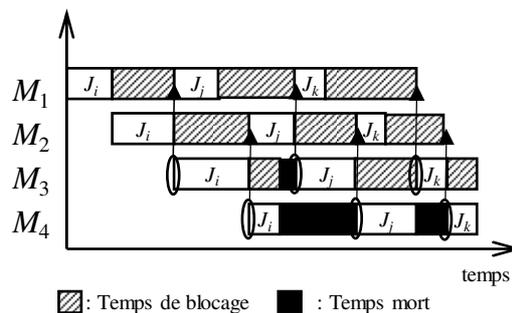


Figure 1-4. Flowshop avec la contrainte de blocage *RCb*.

Nous avons introduit une **nouvelle contrainte de blocage de type *RCb\**** (Release when Completing blocking\*) (Trabelsi et al., 2010). Cette contrainte existe lorsqu’une ressource reste bloquée par une tâche jusqu’à la fin de l’exécution de sa prochaine opération sur la ressource suivante. Dans les cas industriels, on peut la voir sur un système de production où

deux ressources successives dépendent d'un même consommable (outil, imprimante, ...), de sorte qu'elles sont dans l'incapacité de fonctionner simultanément.

La figure 1-5 présente l'exemple d'un flowshop dans lequel toutes les contraintes de blocage entre les machines sont de type *RCb\**.

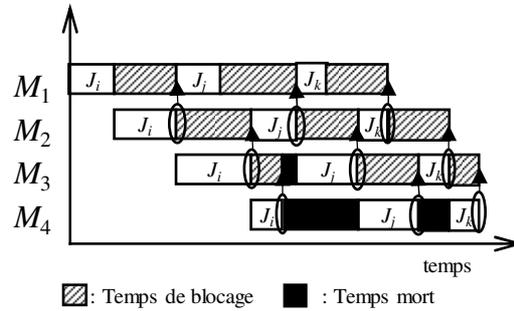


Figure 1-5. Flowshop avec la contrainte de blocage *RCb\**.

**La contrainte de blocage de type *NWb*** (No-Wait blocking) existe également et se trouve largement étudiée dans la littérature. On la rencontre lorsqu'une tâche doit passer successivement et sans attente sur toutes les ressources qu'elle sollicite. Dans les cas où l'on est confronté à cette contrainte de blocage, on préfère différer le début de traitement de chaque tâche. Dans la pratique, on rencontre ce type de conditions de blocage dans le milieu hospitalier où, par exemple, on doit pratiquer une intervention chirurgicale sur un patient immédiatement après l'avoir anesthésié. On peut aussi la rencontrer lors de différents procédés industriels, comme par exemple en micro-électronique où certaines opérations nécessitent un enchaînement strict.

La figure 1-6 présente l'exemple d'un problème de type flowshop dans lequel la contrainte de blocage entre toutes les machines est No-Wait (*NWb*).

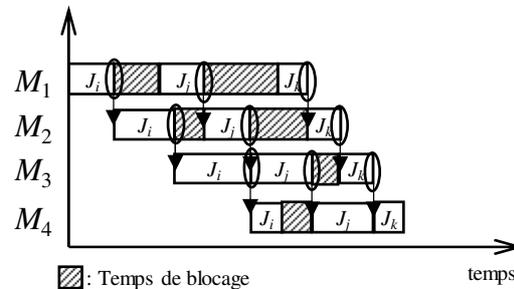


Figure 1-6. Flowshop avec la contrainte de blocage *NWb*.

Dans les travaux relatifs à la thèse de Wajdi Trabelsi (2012), nous nous sommes intéressés aux cas où les contraintes de blocages pouvaient être différentes d'une ressource à l'autre dans un problème d'ordonnancement. C'est ce que nous appelons les problèmes avec contraintes de blocage mixtes. Pour cette raison, et dans le but de spécifier qu'en un point du système de production, nous modélisons un stock comme infini, nous avons baptisé *Wb* (Without blocking constraint) une contrainte de blocage qui n'en est pas une.

### 1.3 Contribution méthodologique et verrous scientifiques

La plupart du temps, on donne ce genre de problèmes à résoudre à des étudiants qui débutent dans l'ordonnancement, avant de leur donner des travaux « plus compliqués » sur lesquels travailler.

La résolution des problèmes de type flowshop classique et hybride peut donc, au vu de l'introduction, ne pas sembler être un verrou. Or, j'estime que continuer à travailler sur ce problème est une saine façon d'aborder le travail sur l'ordonnancement, car il rappelle les basiques. De la même façon qu'un musicien professionnel continue à travailler ses gammes, j'estime utile de continuer à travailler sur ces problèmes. Cette façon d'aborder les problèmes est une contribution méthodologique à la résolution des problèmes d'ordonnancement.

De cette contribution méthodologique, peuvent naître plusieurs contributions scientifiques.

D'abord, l'idée de la création d'heuristiques nouvelles, qui permettent d'aborder un problème sous un angle nouveau. La multiplication des angles d'attaque d'un problème permet en effet d'en améliorer la résolution.

Ensuite, revoir des choses connues et classiques permet non seulement de les avoir bien en tête, mais aussi d'être en mesure de les questionner. C'est un de ces questionnements qui est à l'origine d'une amélioration de la célèbre méthode NEH (Sauvey et Sauer, 2020).

Enfin, s'il est vrai que l'attaque du cas général, connu et abordé depuis 1954, ne permet ni de briller comme Johnson ni de publier aussi facilement lorsque l'on aborde un « nouveau » problème, l'attaque du cas général permet d'ouvrir un autre verrou scientifique, la possibilité d'offrir au plus grand nombre les résultats des travaux développés sur le problème « fondamental ». En effet, les problèmes qualifiés de nouveaux dans la littérature au sujet des flowshops sont toujours une complexification du problème (Allahverdi et *al.*, 2020), (Marichelvam et *al.*, 2020). Or, les méthodes qui sont utilisées pour les résoudre sont très souvent des adaptations de celles qui ont fait leurs preuves sur le problème de base.

En conclusion, cette répétition des gammes sur le problème de base est une contribution méthodologique à laquelle je vois des contributions scientifiques à la résolution d'un problème de type flowshop, quelle que soit la complexification qu'on lui adjoint.

Dans ce cadre, les verrous scientifiques que nous avons soulevés et auxquels nous avons essayé de répondre sont :

- Quelle est la complexité de ces nouveaux problèmes de flowshop avec blocages mixtes ?
- Quelle est la limite des méthodes exactes sur ce problème ?
- Quels angles nouveaux peut-on utiliser pour aborder ces problèmes de type flowshop avec ou sans blocage ?
- Comment concevoir des méthodes et des outils réutilisables sur des problèmes semblables ?

## 1.4 Flowshop Classique

Dans un premier temps, nous avons étudié le cas du flowshop classique avec contraintes de blocage mixtes. Dans ce paragraphe, nous nous intéressons successivement à la complexité de ces problèmes, aux bornes inférieures puis aux méthodes exactes et approchées que nous avons développées.

### 1.4.1 Complexité

Au sujet de la complexité des problèmes de type flowshop, on peut trouver des informations détaillées et complètes dans les références suivantes (Martinez, 2005) et (Oulamara, 2009).

Pour les problèmes de type flowshop classique, Johnson a démontré en 1954 que les problèmes à 2 machines étaient polynomiaux et ceux à partir de 4 machines NP-difficiles au sens fort. Concernant le problème à trois machines, il est polynomial si les temps des opérations sur la deuxième machine sont uniformément inférieurs à ceux d'une machine adjacente (Garey et al., 1976). D'une manière générale, le problème de type flowshop classique, quelle que soit la généralisation envisagée au problème, préemption (Gonzalez et Sahni, 1978), dates de disponibilité (Lenstra et al., 1977) avec cas préemptif (Cho et Sahni, 1981), sont NP difficiles au sens fort dès que le problème atteint 3 machines et parfois même avant.

Pour ce qui concerne les travaux au sujet des contraintes de blocage, il a été démontré que les problèmes deviennent NP-difficiles au sens fort, là aussi, dès que le nombre de machines du problème atteint 3, et quelquefois pour un nombre de machines inférieur. C'est le cas avec la contrainte *NWb* (Röck, 1984), pour la contrainte *RSb* (Hall et Sriskandarajah, 1996), pour une contrainte *RSb* avec capacité de stockage limitée (Papadimitriou et Kanellakis, 1980). Pour les problèmes de type flowshop avec des contraintes de transport, des résultats de complexité ont été publiés dans (Soukhal et al., 2005).

Pour ce qui concerne la contrainte de blocage *RCb*, le problème reste ouvert pour 4 machines, car il est polynomial pour  $m=3$  et NP-difficile pour  $m=5$  (Martinez et al., 2006). Cette dernière contrainte semble donc « plus facile » à aborder que les autres, et il est agréable de le vérifier avec les comparaisons des temps de calculs lors des expériences que nous avons réalisées.

Les travaux existants au sujet des contraintes de blocage mixtes ont été effectués sur les associations de contraintes suivants, (*RSb*, *RCb*) par (Martinez et al., 2006), (*NWb*, *RSb*) par (Bagchi et al., 2006).

**Contributions :** Pour la contrainte de blocage *RCb\**, nous avons montré que le problème devient NP-difficile à partir de 4 machines, et qu'il est polynomial jusqu'à 3 machines (Trabelsi et al., 2011a).

Dans le cadre de contraintes de blocage mixtes, les travaux effectués dans la thèse de Wajdi Trabelsi (2012) ont porté sur les associations de contraintes choisies parmi l'ensemble  $\{Wb, RSb, RCb^*, RCb\}$ . Nous avons obtenu des résultats de complexité pour des problèmes avec blocages mixtes, dont le Tableau 1.1 donne un aperçu synthétique.

Ces résultats de complexité ont été obtenus en utilisant les graphes disjonctifs et ont été présentés à la conférence IFAC en 2011 (Trabelsi et al., 2011a).

$RCb^*$	F2  $RCb^*$  Cmax	Polynomial
	F3  $RCb^*$  Cmax	Polynomial
	F4  $RCb^*$  Cmax	NP-Difficile
Mixte (2 contraintes)	F3  $RCb, Wb$  Cmax	Polynomial
	F3  $Wb, RCb$  Cmax	Polynomial
	F3  $RCb^*, Wb$  Cmax	Polynomial
	F3  $Wb, RCb^*$  Cmax	Polynomial
	F4  $RCb, Wb, RCb$  Cmax	Polynomial
	F4  $RCb^*, Wb, RCb^*$  Cmax	Polynomial
	F4  $Wb, RCb^*, Wb$  Cmax	NP-Difficile
	F( $M>3$ ) ---, $Wb, Wb, ---$  Cmax	NP-Difficile
	F( $M>3$ ) ---, $RSb, RSb, ---$  Cmax	NP-Difficile
F( $M>4$ ) ---, $RCb^*, RCb^*, ---$  Cmax	NP-Difficile	
Mixte (3 contraintes)	F4  $RCb^*, Wb, RCb$  Cmax	Polynomial
	F4  $RCb, Wb, RCb^*$  Cmax	Polynomial
	F4  $RCb, RSb, RCb^*$  Cmax	Polynomial

Tableau 1-1. Résultats de complexité pour différents types de problème avec blocages mixtes.

**Conclusion :** Les problèmes avec contraintes de blocage mixtes, dont l'une est  $RSb$ , restent à étudier. Pour les problèmes à trois contraintes de blocage, trois cas polynomiaux ont été prouvés et tous les autres problèmes non traités restent ouverts. Il reste 11 problèmes ouverts sur 16 de type F3, et 44 problèmes ouverts sur 64 de type F4.

Les problèmes industriels étant souvent de taille importante, on peut conclure de cette étude de complexité que la plupart sont NP-difficiles.

#### 1.4.2 Bornes inférieures

Une borne inférieure est une valeur au-dessous de laquelle on prouve que la fonction objectif ne peut pas descendre, sans forcément l'atteindre. A première vue, pour celui qui ne s'intéresse qu'à la résolution du problème, une borne inférieure peut sembler inutile. Cependant, l'information qu'elle donne peut s'avérer utile. Le calcul d'une borne inférieure permet, d'une part, de développer des méthodes exactes, de type séparation et évaluation, par exemple, et d'autre part, d'évaluer les pourcentages d'erreur des méthodes approchées.

La littérature propose des bornes inférieures pour les problèmes de type flowshop classiques (Akkan et Karabatı, 2004). Pour le cas de flowshop avec la contrainte no-idle, Saadani et al. (2003) ont proposé de nombreux travaux, parmi lesquels une adaptation de la borne inférieure développée par Baptiste et Hguny (1997). Ronconi (2005) a proposé une borne inférieure pour les flowshop avec blocage s'appuyant précisément sur les propriétés des contraintes de blocage.

**Contributions :** Nous avons adapté la borne basée sur les temps de tête et les temps de queue aux différentes contraintes de blocage, grâce à l'introduction d'une variable  $\psi_k$  qui prend des valeurs égales à 0 ou 1 en fonction de la contrainte de blocage existante entre les machines  $k$  et  $k+1$ . La borne inférieure qui résulte de ces travaux est la suivante :

$$B_{\text{inf}} = \max_{k=1, \dots, M} \left[ \sum_{i=1, \dots, N} [P_{ik} + P_{i(k+1)} \cdot \psi_k] + \min_{i=1, \dots, N} \left[ \sum_{s=1}^{k-1} P_{is} \right] + \min_{i=1, \dots, N} \left[ \left( \sum_{s=k+1}^M P_{is} \right) - P_{i(k+1)} \cdot \psi_k \right] \right]$$

avec :

$$\psi_k = \begin{cases} 1 & \text{s'il y a un blocage de type } RCb \text{ ou } RCb^* \text{ entre la machine } M_k \text{ et la machine } M_{k+1} \forall k < M \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

On peut trouver un exemple détaillé dans la thèse de Wajdi Trabelsi (Trabelsi, 2012).

**Résultats :** Cette borne inférieure a été évaluée sur toutes les instances proposées par Martinez (2005). Ces benchmarks contiennent des durées d'opérations uniformément comprises dans l'intervalle [1, 99]. Elle a été testée pour les cas sans blocage (*Wb*), avec blocage *RCb* entre toutes les machines du problème ainsi que pour le cas de blocage mixte où le motif de blocages (*RCb*, *RSb*, *RCb\**, *Wb*) est répété entre les machines successives du problème. Elle permet d'obtenir un résultat de borne inférieure en un temps proche de la minute pour les couples (*N* jobs ; *M* machines) suivants : (8 ; 100), (9 ; 50), (10 ; 20), (11 ; 10) et (12 ; 7). Le pourcentage d'erreur de cette borne inférieure par rapport aux résultats optimum s'améliore à mesure que le nombre de machines décroît et que le nombre de jobs augmente (Trabelsi et al., 2011b).

Pour les instances de problèmes ayant un nombre de machines inférieur à 7, cette borne inférieure est proche de la solution optimale et l'égale globalement plus d'une fois sur dix. Elle perd de sa précision selon ce critère à mesure que le nombre de machines augmente. A partir de 15 machines, elle ne permet plus d'atteindre un résultat optimal (pour un pourcentage d'erreur global de 10% environ, faiblement variable en fonction du nombre de jobs compris entre 5 et 12).

Pour toutes les instances testées, le pourcentage d'erreur de cette borne est resté sous la barre des 15%. Cependant, elle doit encore être testée sur des instances avec un plus grand nombre de jobs afin de vérifier son utilité sur un problème de taille industrielle, où souvent les nombres de jobs sont supérieurs aux nombres de machines.

### 1.4.3 Méthodes exactes

La communauté scientifique s'est beaucoup intéressée aux flowshops classiques. Les contributions sont nombreuses, depuis les années 1960. La plus récente méthode de séparation et d'évaluation permet de résoudre des instances allant jusqu'à 50 jobs et 10 machines (Carlier et Rebaï, 1996). Depuis, des modèles mathématiques ont été développés pour des types de flowshop particuliers, par exemple avec des temps d'opérations qui dépendent de la position du job dans la séquence (Sanchez-Herrera et al., 2019), ou des contraintes particulières comme la minimisation conjointe du temps de parcours moyen et de la consommation d'énergie (Öztop et al., 2020), ou encore la prise en compte des périodes de coupure avec une formulation du temps discrète ou continue (Castro et al., 2019).

**Contributions :** Nous avons développé un modèle mathématique linéaire en nombres entiers pour résoudre le problème d'ordonnancement du flowshop en considérant les trois conditions de blocages suivantes (*Wb*, *RSb* et *RCb\**), ainsi que la possibilité de choisir, pour chacune, l'endroit où elle s'applique dans le problème. Ce modèle est basé sur celui de Sergio Martinez (2005), qui prenait déjà en compte la contrainte de blocage *RCb*, et dans lequel les dates de début et de fin de chaque job sur les machines sont les variables de décision. Ce nouveau

modèle, dont les équations sont données ci-dessous, a été développé et validé sur le logiciel Xpress-MP avec les benchmarks de Martinez.

Les paramètres utilisés pour la formulation mathématique du problème d'ordonnancement de type Flow-Shop avec blocage mixte sont les suivants :

- $N$  : Nombre de jobs.
- $M$  : Nombre de machines.
- $P_{i,k}$  : Temps d'exécution de l'opération  $O_{i,k}$ .
- $M_{h,k} = 1$  s'il y a un blocage de type  $h$  entre l'étage  $k$  et l'étage  $k+1$  et 0 sinon. Avec :
  - $h=1$  : s'il n'y a pas de blocage entre l'étage  $k$  et l'étage  $k+1$  ( $Wb$ ).
  - $h=2$  : s'il y a un blocage de type  $RSb$  entre l'étage  $k$  et l'étage  $k+1$ .
  - $h=3$  : s'il y a un blocage de type  $RCb^*$  entre l'étage  $k$  et l'étage  $k+1$ .
  - $h=4$  : s'il y a un blocage de type  $RCb$  entre l'étage  $k$  et l'étage  $k+1$ .

Les variables de décision du modèle permettant d'obtenir l'ordre de passage des jobs sur les étages sont les suivantes :

- $S_{j,k}$  : Date de début du job en position  $j$  dans la séquence  $G$  sur la machine  $k$ .
- $C_{j,k}$  : Date de fin du job en position  $j$  dans la séquence  $G$  sur la machine  $k$ .
- $G_{i,j} = 1$  si le job  $J_i$  occupe la position  $j$  dans la séquence  $G$ , et 0 sinon.
- $C_{j,k}$  = Date de fin du job  $J_i$  sur l'étage  $k$ .

Les équations du modèle mathématique sont les suivantes :

$$\text{Min } C_{\max} \quad 1.1$$

Avec les contraintes :

$$C_{\max} \geq C_{j,m} \quad \forall j \in \{1, \dots, N\} \quad 1.2$$

$$S_{j,k} \geq S_{j,k-1} + \sum_{i=1}^N P_{i,k-1} \cdot G_{i,j}, \quad \forall j \in \{1, \dots, N\}, \forall k \in \{2, \dots, M\} \quad 1.3$$

$$S_{j,k} \geq C_{j-1,k} \cdot M_{1,k} + S_{j-1,k+1} \cdot M_{2,k} + C_{j-1,k+1} \cdot M_{3,k} + S_{j-1,k+2} \cdot M_{4,k} \quad \forall j \in \{2, \dots, N\}, \forall k \in \{1, \dots, M-2\} \quad 1.4$$

$$S_{j,m-1} \geq C_{j-1,m-1} * M_{1,m-1} + S_{j-1,m} * M_{2,m-1} + C_{j-1,m} * M_{3,m-1}, \quad \forall j \in \{2, \dots, N\} \quad 1.5$$

$$S_{j,m} \geq C_{j-1,m} \quad \forall j \in \{2, \dots, N\} \quad 1.6$$

$$C_{j,k} = S_{j,k} + \sum_{i=1}^N P_{i,k} * G_{i,j}, \quad \forall j \in \{1, \dots, N\}, \forall k \in \{1, \dots, M\} \quad 1.7$$

$$\sum_{i=1}^N G_{i,j} = 1, \quad \forall j \in \{1, \dots, N\} \quad 1.8$$

$$\sum_{j=1}^N G_{i,j} = 1, \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad 1.9$$

$$G_{i,j} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}, \forall j \in \{1, \dots, N\} \quad 1.10$$

$$S_{j,k} \geq 0, \quad \forall j \in \{1, \dots, N\}, \forall k \in \{1, \dots, M\} \quad 1.11$$

L'équation (1.2) impose que  $C_{max}$  soit supérieur ou égal à la date de fin de tous les travaux sur la dernière machine. L'équation (1.3) représente la contrainte de précédence entre les opérations successives d'un même job. Pour commencer son opération sur une machine, le job doit d'abord terminer son opération sur la machine précédente. L'équation (1.4) modélise différentes contraintes de blocage représentées par le paramètre  $M_{h,k}$ . Par exemple, s'il y a une contrainte  $RSb$  entre la machine  $k$  et la machine  $k+1$ , l'équation (1.4) devient  $S_{j,k} \geq S_{j-1,k+1}$ . L'équation (1.5) est le cas particulier de l'équation (1.4) qui ne traite que de l'avant-dernière machine. Le blocage  $RCb$  n'est pas pris en considération ici parce qu'il fait intervenir la deuxième machine à partir de celle qui est considérée. L'équation (1.6) est encore un cas particulier de (1.4) qui, cette fois-ci, ne traite que de la dernière machine qui, par définition, est sans blocage. L'équation (1.7) calcule la date de fin des tâches. L'équation (1.8) assure que chaque job n'occupe qu'une seule position  $j$  dans la séquence  $G$ . L'équation (1.9) assure que chaque position  $j$  de la séquence  $G$  n'est attribuée qu'à un seul job. L'équation (1.10) indique que la variable  $G_{i,j}$  est booléenne, égale à 1 si  $J_i$  est à la position  $j$  dans la séquence  $G$ , et égale à 0 sinon. L'équation (1.11) assure que la date de début des jobs est positive.

**Résultats :** Notre modèle linéaire permet de résoudre tous les problèmes dont la taille est inférieure à 10 jobs en moins de 5 minutes, quelle que soient les conditions de blocage considérées. Cette efficacité devient conditionnée à un nombre de machines supérieur à 20 dès que le nombre de jobs atteint 12.

Il est rassurant de constater que les résultats de complexité se retrouvent dans les temps moyens de calcul. Dans les cas de blocage mixte, ils sont toujours significativement inférieurs à ceux obtenus pour des conditions de blocage identiques entre toutes les machines d'un problème. Ces travaux ont été présentés à la conférence IFAC'2011 à Milan (Trabelsi *et al.*, 2011a), et les détails des résultats qui ont été obtenus sont disponibles dans la thèse Wajdi Trabelsi (Trabelsi, 2012).

#### 1.4.4 Méthodes approchées

Afin de résoudre des problèmes de taille « industrielle » dans un temps raisonnable, nous avons proposé des méthodes approchées, heuristiques et méta-heuristiques. Là encore, la littérature scientifique a proposé beaucoup de méthodes, mais l'heuristique qui domine, encore aujourd'hui, toutes les autres, est une des plus simples. Elle a été proposée par Nawaz, Enscore et Ham en 1983. Depuis, la plupart des articles qui proposent une heuristique pour résoudre ce problème prennent NEH comme référence.

Dernièrement, une revue de littérature a été publiée au sujet des problèmes de type flowshop avec contraintes de blocage (Miyata et Nagano, 2019), dans laquelle les 139 papiers recensés prouvent que cette problématique a intéressé beaucoup de scientifiques.

**Contributions :** Nous avons proposé deux méthodes gloutonnes pour résoudre les problèmes de type flowshop. L'une se base sur le fait qu'il faut minimiser les temps d'inactivité des machines, et l'autre sur le calcul d'un critère afin de choisir le prochain job à placer dans la séquence partielle.

En 2009, nous nous sommes intéressés au cas particulier du blocage de type  $RCb$  et avons proposé l'heuristique que nous avons présentée à la conférence ROADEF en 2009 (Sauvey et Sauer, 2009). Elle se base sur le profil d'occupation des machines par les jobs déjà placés dans la séquence partielle en cours pour sélectionner, parmi la liste des jobs restants, celui qui cause le moins de temps d'inactivité. Cette heuristique est voisine de celle proposée dans (Mac Cormick *et al.*, 1989). En effet, si on observe le diagramme de Gantt d'un ordonnancement respectant cette contrainte, le profil du « job idéal à placer juste après »

apparaît de façon quasi évidente, comme le montre la figure 1-7. Seul reste à choisir le premier job à placer. Lorsque le nombre de jobs est suffisamment faible, on peut tester l'heuristique avec tous les jobs en première position et retenir la meilleure solution comme solution générale de cette heuristique. Cette heuristique donne des bons résultats, qui s'améliorent à mesure que la taille du problème augmente. Sur les problèmes avec un blocage *RCb*, ces résultats deviennent meilleurs que ceux de NEH à partir de 50 jobs. En revanche, on peut faire la critique suivante : plus la construction de la solution avance avec cette heuristique et moins les jobs qui restent à placer correspondent aux caractéristiques qu'ils « devraient » avoir. Sur la base de cette heuristique, nous avons développé une méthode d'amélioration locale (SS2) qui, pour solution existante, calcule les temps d'inactivité des machines autour des jobs, retire de la solution le job qui totalise le plus grand temps d'inactivité machine et le réinsère à l'endroit où il en totalise le moins.

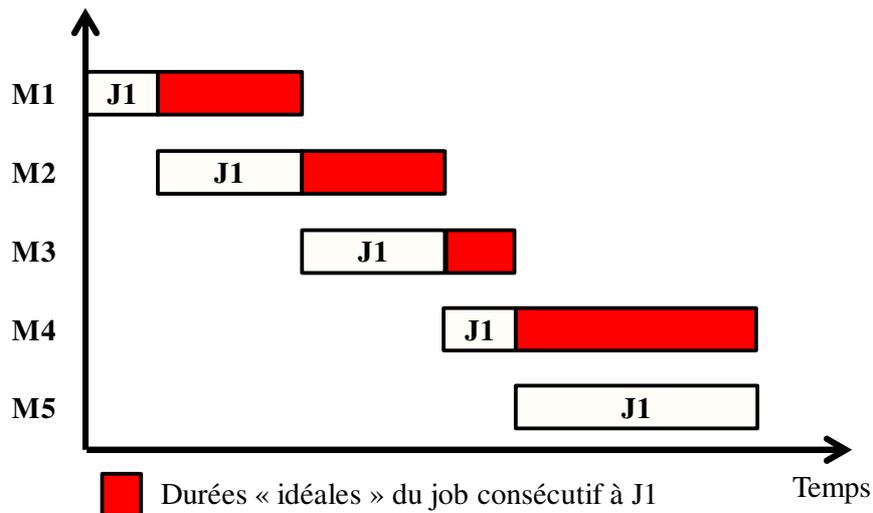


Figure 1-7. Illustration de l'heuristique SS1.

Par la suite, l'heuristique TSS a été développée et figure dans l'article publié dans C&OR que nous avons écrit au sujet des heuristiques et méta-heuristiques pour les problèmes de type flowshop avec conditions de blocage mixtes (Trabelsi et *al.*, 2012). Cette heuristique par construction consiste à utiliser le critère suivant afin de choisir le prochain job à placer lors de la recherche de solution.

$$Cr = \text{Min} (C_{maxp} + \text{SomTpsIn} - \text{SomTpsEx})$$

Avec :

- $C_{maxp}$  : Makespan partiel avec le nouveau job placé.
- $\text{SomTpsIn}$  : Somme des temps d'inactivité des machines, en prenant en compte aussi bien les temps d'attente que les temps de blocage.
- $\text{SomTpsEx}$  : Somme des temps d'exécution des opérations placées dans l'ordonnancement partiel.

Pour obtenir le meilleur ordonnancement possible, on cherche à minimiser le temps d'inactivité des machines, en tentant de maximiser leur taux d'utilisation, ce qui explique les deux parties de la formule du critère  $Cr$ . Ensuite, comme pour la première heuristique que nous avons proposée, il reste à choisir le job qui va débiter. On teste donc les  $N$  possibilités pour garder celle qui offre la meilleure solution. Une amélioration locale a également été développée sur la base de cette heuristique.

**Résultats :** Même si nous avons développé ces heuristiques dans le but de résoudre des problèmes avec blocages mixtes, nous avons pu comparer leurs résultats respectifs avec ceux que l'on obtient avec NEH, sur les problèmes de Taillard dans le cas sans blocage. C'est ce que présente le Tableau 1-2.

Même si les performances de chacune des heuristiques sont faibles comparées à la méthode NEH, leur développement nous a permis de développer deux nouvelles améliorations locales, basées sur l'idée de chacune d'elles. Quand TSS est assez consommatrice de temps de calcul, SS2 est relativement plus rapide, et cette constatation reste vraie pour les améliorations locales.

Ainsi, lorsqu'on adjoint à l'heuristique NEH l'amélioration locale SS2, nous constatons une amélioration sensible des résultats, avec une consommation supplémentaire de temps de calcul acceptable.

		NEH	NEH	SS2	SS2	TSS	TSS	NEH-SS2	NEH-SS2
		Erreur	Temps	Erreur	Temps	Erreur	Temps	Erreur	Temps
20	5	3,11	0	10,97	0	11,05	0	2,77	0
20	10	4,50	0	13,57	0	13,65	0	3,62	0
20	20	3,76	0	9,66	0	9,77	0	3,25	0
50	5	0,52	0	8,68	1	8,85	2	0,50	0
50	10	3,66	0	12,44	1	12,21	4	3,31	0
50	20	6,39	0	15,95	1	16,57	6	5,84	0
100	5	0,44	0	7,16	15	6,94	35	0,39	3
100	10	2,00	0	11,60	16	11,42	58	1,83	4
100	20	5,27	1	15,87	17	15,89	99	4,82	4
200	10	1,14	7	9,66	237	0,00	0	1,03	35
200	20	3,46	10	14,93	248	0,00	0	3,11	44
500	20	1,65	157	0,00	0	0,00	0	1,45	755

**Tableau 1-2. Taux d'erreur par rapport à la solution optimale et temps de calcul pour différentes heuristiques.**

Du côté des méta-heuristiques, nous avons développé principalement les trois méthodes suivantes : les particules électromagnétiques (electromagnetism like algorithm), le recuit simulé (simulated annealing) et les algorithmes génétiques (genetic algorithm).

L'algorithme « electromagnetism like » simule le comportement de solutions sous la forme de particules chargées électriquement en fonction de la valeur de la fonction objectif. Les forces d'attraction et de répulsion qui s'exercent entre elles permettent de faire évoluer les populations de particules vers la solution globale, sans se faire piéger par des optima locaux. Nous avons développé cet algorithme en 2009, après une étude bibliographique qui nous présentait cet algorithme comme prometteur sur les problèmes d'ordonnancement (Birbil et Fang, 2003), (Dieter et al., 2006), (Yuan et Sauer, 2007). L'expérience nous a dissuadé de continuer dans cette direction. La méthode de recuit simulé est très simple à programmer et donne de bons résultats, et l'algorithme génétique, bien que légèrement plus compliqué, continue de nous donner d'excellents résultats sur tous les problèmes que nous abordons (Sauvey et Sauer, 2012).

## 1.5 Flowshop Hybride

Les problèmes de type flowshop hybride sont l'extension des problèmes de type flowshop au cas où l'on dispose de plusieurs ressources à au moins un endroit (appelé étage) de la chaîne de production. Cette augmentation du nombre de machines est souvent choisie dans les entreprises pour en augmenter la rentabilité. En effet, en faisant sauter le bouchon qui se crée en amont des machines critiques, elles augmentent le flux (ou « throughput ») qui traverse leur moyen de production de biens ou de services (Goldratt, 1993).

Ces problèmes sont étudiés depuis très longtemps par la communauté scientifique, puisque le premier article présentant un état de l'art sur le sujet date, à notre connaissance, de 1979 (Graham *et al.*, 1979).

La revue de la littérature la plus récente disponible sur les problèmes de type flowshop hybride démontre que ces problèmes font l'objet d'une douzaine d'études par an depuis 2004 (Ruiz et Vazquez-Rodriguez, 2010). Cette étude montre que, pour l'instant, les scientifiques concentrent principalement leurs efforts sur l'étude de machines parallèles identiques. Elle montre également qu'un quart des efforts porte sur les méthodes exactes, 15% sur la modélisation mathématique du problème et 10% sur la méthode de séparation et évaluation, un autre quart porte sur la résolution de ces problèmes avec des méta-heuristiques. La moitié des travaux publiés concerne des heuristiques très spécifiques, directement liées aux problèmes qui ont donné naissance à l'étude, et donc difficilement généralisable. Elles permettent cependant d'obtenir des solutions rapidement à des problèmes de grande taille, dont la précision reste sujette à caution, dans la mesure où les problèmes visés ont souvent des particularités qui les soustraient aux benchmarks.

### 1.5.1 Complexité

Les problèmes de type flowshop hybrides sont tous NP-difficiles (Gupta, 1988), y compris dans le cas préemptif (Hoogeveen *et al.*, 1996). Ainsi, les méthodes exactes ne sont applicables que sur une gamme limitée de problèmes, vite bornée par le nombre de jobs ou le nombre d'étages. Pour un usage industriel, les méthodes heuristiques et méta-heuristiques semblent donc être les seules à pouvoir résoudre valablement ces problèmes.

### 1.5.2 Bornes inférieures

On peut trouver dans la littérature de nombreux travaux traitant des bornes inférieures au problème de type flowshop hybride. Haouari s'est particulièrement intéressé à ce problème et a proposé deux bornes inférieures (Haouari et Gharbi, 2004), (Haouari et Hidri, 2008), ainsi que des stratégies de bornage (Hidri et Haouari, 2011). Le développement le plus récent de bornes inférieures pour les flowshop hybrides a été appliqué à un système de d'assemblage de circuits imprimés électroniques (Sabouni et Logendran, 2018).

**Contributions :** Une borne inférieure triviale, que nous pouvons appeler *LBI*, est la valeur maximale sur les jobs de la somme des temps opératoires sur chacun des étages.

Nous avons proposé une autre borne inférieure basée sur le temps maximal d'occupation des étages, inspirée de (Santos *et al.*, 1995), que nous avons adaptée aux conditions de blocage mixtes. Elle avait, dans un premier temps, été adaptée au cas avec une contrainte de blocage *RCb* entre tous les étages (Yuan *et al.*, 2009).

Afin de l'adapter aux problèmes avec des contraintes de blocages possiblement différentes entre étages successifs, nous avons introduit la variable  $\psi_k$  dont la définition est donnée plus loin et qui permet d'utiliser un modèle unique et global (Trabelsi, 2012).

**Théorème.** Soit un Flow-Shop hybride composé de  $N$  jobs,  $K$  étages et  $M_k$  machines à chaque étage, soumis à différentes contraintes de blocage. Une borne inférieure du makespan du problème d'ordonnement de ce système est donnée par :

$$LB2 = \max_{k=1, \dots, K} \frac{1}{M_k} \cdot \left[ \sum_{i=1}^N [P_{ik} + P_{i(k+1)} \cdot \psi_k] + \sum_{y=1}^{M_k} LS(a_y, k) + \sum_{y=1}^{M_k} RS(b_y, k) \right] \quad 1.12$$

Avec :

- $\psi_k = \begin{cases} 1 & \text{si } k < K \text{ et s'il existe une contrainte de blocage } RCb \text{ ou } RCb^* \text{ entre les étages } k \text{ et } k+1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

- $LS(i, k)$  (left side sum) : Somme des temps opératoires du job  $J_i$ , jusqu'à l'étage  $k-1$  :

$$LS(i, k) = \begin{cases} \sum_{k'=1}^{k-1} P_{ik'} & \text{si } k > 1 \\ 0 & \text{si } k = 1 \end{cases} \quad 1.13$$

- $LSA(k)$  : Liste triée dans l'ordre croissant de  $LS(i, k)$  :

$$LSA(k) = \{LS(a_1, k), LS(a_2, k), \dots, LS(a_N, k)\} \text{ avec } LS(a_r, k) \leq LS(a_{r+1}, k).$$

- $RS(i, k)$  (right side sum) : Somme des temps opératoires du job  $J_i$  à partir de l'étage  $k+1$  :

$$RS(i, k) = \begin{cases} \sum_{k'=k+1}^K P_{ik'} - P_{i(k+1)} \cdot \psi_k & \text{si } k < K \\ 0 & \text{si } k = K \end{cases} \quad 1.14$$

- $RSA(k)$  : Liste triée dans l'ordre croissant de  $RS(i, k)$  :

$$RSA(k) = \{RS(b_1, k), RS(b_2, k), \dots, RS(b_N, k)\} \text{ avec } RS(b_r, k) \leq RS(b_{r+1}, k).$$

La preuve de ce théorème est disponible dans la thèse de Wajdi Trabelsi, ainsi que dans l'article présenté à la conférence Incom'2012 à Bucarest (Trabelsi et al., 2012).

**Résultats :** Nous avons testé cette borne inférieure sur les problèmes de Vignier (1997), sans contrainte de blocage dans un premier temps, puis avec une contrainte de blocage mixte composée de la répétition de la séquence de contraintes de blocage suivante ( $Wb, RSb, RCb^*, RCb$ ).

Le Tableau 1-3 présente les solutions que nous avons obtenues sur le benchmark de Vignier pour le problème sans contrainte de blocage, pour ( $LB1$ ) et ( $LB2$ ). La médiocrité générale de la borne  $LB1$  s'explique par un nombre de machines différents de 1 sur plusieurs étages. La borne que nous avons développée semble plutôt puissante, dans la mesure où elle présente un taux d'erreur par rapport à la solution optimale décroissant en fonction du nombre de jobs, légèrement croissante en fonction du nombre d'étages et toujours inférieur à 2,5% pour les cas où il existe un étage goulot. Dans les cas où la répartition du nombre de machines par étage est uniforme, l'efficacité de  $LB2$  chute significativement, et il devient intéressant de prendre en considération  $LB1$ , afin de prendre comme borne inférieure le minimum entre les 2 valeurs ( $Binf$ ). Cette grosse différence d'efficacité pour  $LB2$  entre flowshop hybride uniforme et non uniforme est encore renforcée par le nombre de fois où la borne inférieure donne la solution optimale. Cette valeur est souvent proche de 6 (sur 6 instances) pour les cas non uniformes et baisse fortement pour les cas uniformes.

Étages	Machines par étage : $M_k$	$j=5$				$j=10$				$j=15$			
		LB1 (%)	LB2 (%)	B <sub>inf</sub> (%)	B <sub>inf</sub> = C <sub>max</sub>	LB1 (%)	LB2 (%)	B <sub>inf</sub> (%)	B <sub>inf</sub> = C <sub>max</sub>	LB1 (%)	LB2 (%)	B <sub>inf</sub> (%)	B <sub>inf</sub> = C <sub>max</sub>
K=2	(1 3)	54,62	0	0	6	74,53	0	0	6	81,02	0	0	6
	(3 1)	53,66	0	0	6	78,14	0,19	0,19	5	82,32	0	0	6
	(3 3)	18,66	14,38	10,92	1	36,86	4,37	4,37	0	50,44	1,15	1,15	3
K=3	(1 3 3)	43,60	1,26	1,26	5	68,03	0	0	6	74,93	0	0	6
	(3 3 1)	46,90	0,48	0,48	5	64,42	0,21	0,21	5	75,04	0	0	6
	(3 3 3)	11,04	13,75	6,44	2	25,97	6,95	3,75	1	41,18	1,92	1,92	1
	(3 1 3)	44,52	0,96	0,96	5	73,67	0	0	6	74,23	0	0	6
K=5	(1 3 3 2 3)	30,95	2,48	2,48	5	53,43	0,36	0,36	5	64,84	0	0	6
	(3 3 2 3 1)	28,79	1,06	1,06	5	52,49	0	0	6	64,37	0,55	0,55	5
	(3 3 3 3 3)	6,58	12,88	3,47	3	20,08	7,75	4,59	1	22,90	2,30	0,97	4
	(3 3 1 2 2)	28,55	2,32	2,32	3	54,00	1,08	1,08	4	70,83	0	0	1*

**Tableau 1-3. Taux d'erreur des bornes inférieures et occurrences de  $B_{inf} = C_{max}$  pour le cas  $Wb$ .**

On trouve des résultats analogues, avec les mêmes commentaires, pour les cas où le blocage considéré est mixte. On constate que notre borne reste bien efficace, spécialement pour les cas où le nombre de machines par étage est inhomogène, et présente la même faiblesse relative lorsque le nombre de machines est identique sur tous les étages.

### 1.5.3 Méthodes exactes

L'article de Kis et Pesch (2005) présente une revue des méthodes exactes développées pour la résolution du problème de type flowshop hybride jusqu'à 2005, pour deux types de fonctions objectif, le makespan et le temps moyen de passage. Les méthodes utilisées sont principalement la propagation de contraintes et la séparation et évaluation (Branch and Bound). On peut citer, entre autres, un algorithme de séparation et évaluation développé pour le problème à 2 étages avec la contrainte No-Wait (Wang et al., 2015). Un autre a été développé pour traiter un problème avec temps de préparation (setup time) et opérations d'assemblage (Fattahi et al., 2014).

Pour les problèmes génériques de type flowshop hybride à  $k$  étages, les méthodes exactes sont très difficiles à développer. Brah et Hunsucker (1987) ont développé un programme linéaire mixte, puis la première méthode générique par séparation et évaluation. Ils ont proposé un arbre d'exploration pour décrire toutes les possibilités d'ordonnancement, ainsi que la formule qui dénombre le nombre total de nœuds avec lesquels un branchement est possible à chaque étage. Dans (Zohali et al., 2019), les auteurs ont proposé deux modèles mathématiques pour la production de lots dans un système de production de type flowshop hybride. Plusieurs bornes inférieures ont été testées, sur les jobs, sous-ensembles de jobs, ajustées, et plusieurs stratégies de branchement, dont la stratégie de branchement simple et une autre, basée sur le chemin critique, et sont proposées dans (Perregaard, 1995).

**Contributions :** Nous avons proposé une formulation linéaire en nombre entiers du problème de type flowshop hybride mixte avec le choix parmi les contraintes de blocage que nous avons identifiées, c'est-à-dire  $Wb$ ,  $RSb$ ,  $RCb^*$  et  $RCb$ . Ce modèle est présenté ci-dessous.

Les paramètres utilisés pour la formulation mathématique du problème d'ordonnancement de type Flow-Shop hybride avec blocage mixte sont les suivants :

$N$  : Nombre de jobs.

$i, j$  : Indices sur les jobs.

- $K$  : Nombre d'étages.  
 $k$  : Indice sur les étages.  
 $M_k$  : Nombre de machines à l'étage  $k$ .  
 $m$  : Indice sur les machines à chaque étage.  
 $O_{i,k}$  : Opération du job  $J_i$  sur l'étage  $k$ .  
 $P_{i,k}$  : Temps d'exécution de l'opération  $O_{i,k}$ .  
 $B_{h,k} = 1$  s'il y a un blocage de type  $h$  entre l'étage  $k$  et l'étage  $k+1$  et 0 sinon. Avec :  
 $h=1$  : s'il n'y a pas de blocage entre l'étage  $k$  et l'étage  $k+1$  ( $Wb$ ).  
 $h=2$  : s'il y a un blocage de type  $RSb$  entre l'étage  $k$  et l'étage  $k+1$ .  
 $h=3$  : s'il y a un blocage de type  $RCb^*$  entre l'étage  $k$  et l'étage  $k+1$ .  
 $h=4$  : s'il y a un blocage de type  $RCb$  entre l'étage  $k$  et l'étage  $k+1$ .  
 $H$  : Constante suffisamment grande.

Les variables de décision du modèle permettant d'obtenir l'ordre de passage des jobs sur les étages sont les suivantes :

- $x_{ikm} = 1$ , si l'opération  $O_{i,k}$  est affectée à la machine  $m$  de l'étage  $k$  et 0 sinon.  
 $y_{ijkm} = 1$ , si les opérations  $O_{i,k}$  et  $O_{j,k}$  sont affectées à la même machine  $m$  de l'étage  $k$  et 0 sinon.  
 $u_{ijkm} = 1$ , si l'opération  $O_{i,k}$  précède l'opération  $O_{j,k}$  (pas nécessairement immédiatement) sur la machine  $m$  de l'étage  $k$  et 0 sinon.  
 $z_{ijkm} = 1$ , si l'opération  $O_{i,k}$  précède immédiatement l'opération  $O_{j,k}$  sur la machine  $m$  de l'étage  $k$  et 0 sinon.  
 $S_{i,k}$  = Date de début du job  $J_i$  sur l'étage  $k$ .  
 $C_{j,k}$  = Date de fin du job  $J_j$  sur l'étage  $k$ .

En utilisant les paramètres et les variables décrits précédemment, le problème peut être modélisé de la façon suivante :

$$\text{Min } C_{\max} \quad 1.15$$

Sous les contraintes:

$$C_{\max} \geq C_{iK}, \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad 1.16$$

$$C_{ik} = S_{ik} + P_{ik}, \forall i \in \{1, \dots, N\}, \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad 1.17$$

$$S_{ik} \geq C_{i(k-1)}, \forall i \in \{1, \dots, N\}, \forall k \in \{2, \dots, K\} \quad 1.18$$

$$S_{jk} + H(1 - z_{ijkm}) \geq C_{ik} \cdot B_{1k} + S_{i(k+1)} \cdot B_{2k} + C_{i(k+1)} \cdot B_{3k} + S_{i(k+2)} \cdot B_{4k}, \quad 1.19$$

$$\forall i, j \in \{1, \dots, N\}, i \neq j, \forall k \in \{1, \dots, K-2\}, \forall m \in \{1, \dots, M_k\}$$

$$S_{j(K-1)} + H(1 - z_{ij(K-1)m}) \geq C_{i(K-1)} \cdot B_{1(K-1)} + S_{i(K-1)} \cdot B_{2(K-1)} + C_{i(K-1)} \cdot B_{3(K-1)}, \quad 1.20$$

$$\forall i, j \in \{1, \dots, N\}, i \neq j, \forall m \in \{1, \dots, M_k\}$$

$$S_{jK} + H(1 - z_{ijKm}) \geq C_{iK}, \forall i, j \in \{1, \dots, N\}, i \neq j, \forall m \in \{1, \dots, M_k\} \quad 1.21$$

$$\sum_{m=1}^{M_k} x_{ikm} = 1, \forall i \in \{1, \dots, N\}, \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad 1.22$$

$$2y_{ijkm} \leq x_{ikm} + x_{jkm} \leq 2y_{ijkm} + 1, \forall i, j \in \{1, \dots, N\}, i \neq j, \forall k \in \{1, \dots, K\}, \forall m \in \{1, \dots, M_k\} \quad 1.23$$

$$y_{ijkm} = y_{jikm}, \forall i, j \in \{1, \dots, N\}, i \neq j, \forall k \in \{1, \dots, K\}, \forall m \in \{1, \dots, M_k\} \quad 1.24$$

$$u_{ijkm} + u_{jikm} = y_{ijkm}, \forall i, j \in \{1, \dots, N\}, i \neq j, \forall k \in \{1, \dots, K\}, \forall m \in \{1, \dots, M_k\} \quad 1.25$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^N z_{ijkm} \leq 1 \quad \text{and} \quad \sum_{j=1, j \neq i}^N z_{jikm} \leq 1, \forall i \in \{1, \dots, N\}, \forall k \in \{1, \dots, K\}, \forall m \in \{1, \dots, M_k\} \quad 1.26$$

$$2x_{ikm} - 2 \leq \sum_{j=1, j \neq i}^N (z_{ijkm} + z_{jikm}) \leq 2x_{ikm}, \forall i \in \{1, \dots, N\}, \forall k \in \{1, \dots, K\}, \forall m \in \{1, \dots, M_k\} \quad 1.27$$

$$u_{ijkm} - z_{ijkm} \geq 0, \forall i, j \in \{1, \dots, N\}, i \neq j, \forall k \in \{1, \dots, K\}, \forall m \in \{1, \dots, M_k\} \quad 1.28$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N z_{ijkm} \geq \sum_{i=1}^N x_{ikm} - 1 \quad \forall k \in \{1, \dots, K\}, \forall m \in \{1, \dots, M_k\} \quad 1.29$$

$$S_{ik} \geq 0, \forall i \in \{1, \dots, N\}, \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad 1.30$$

$$x_{ikm}, y_{ijkm}, u_{ijkm}, z_{ijkm} \in \{0, 1\}, \forall i \in \{1, \dots, N\}, \forall k \in \{1, \dots, K\}, \forall m \in \{1, \dots, M_k\} \quad 1.31$$

La fonction objectif du problème (1.15) est la minimisation de la date de fin maximale des tâches, appelé  $C_{max}$ . La contrainte (1.16) impose que  $C_{max}$  soit supérieur ou égal à la date de fin de tous les jobs. La contrainte (1.17) calcule la date de fin de toutes les opérations. La contrainte (1.18) représente la contrainte de précédence entre les opérations successives d'un même job. Pour commencer son opération sur un étage aval, un job doit d'abord terminer son opération sur l'étage amont. La contrainte (1.19) modélise les différentes contraintes de blocage, représentées par le paramètre  $B_{hk}$ . Par exemple, s'il y a une contrainte de blocage  $RSb$  entre l'étape  $k$  et le stade  $k+1$ , l'équation (1.19) devient  $S_{jk} + H.(1-z_{ijkm}) \geq S_{i(k+1)}$ . La contrainte (1.20) est un cas particulier de l'équation ci-dessus qui ne traite que de l'avant-dernière opération. La contrainte (1.21) est aussi un cas particulier de la contrainte (1.19), qui ne traite que de la dernière opération qui est obligatoirement sans blocage. La contrainte (1.22) garantit que chaque opération doit être affectée à exactement une machine à chaque étage. Les contraintes (1.23) et (1.24) permettent la cohérence entre les variables  $y_{ijkm}$  et  $x_{ikm}$ , et prennent en charge l'assignation des opérations  $O_{ik}$  et  $O_{jk}$  à la même machine  $m$  d'un étage  $k$ . La contrainte (1.25) définit que parmi les opérations  $O_{ik}$  et  $O_{jk}$ , seule l'une peut précéder l'autre. La contrainte (1.26) garantit que chaque opération a au plus un prédécesseur et un successeur sur la machine  $m$ . La contrainte (1.27) assure la cohérence des séquences sur chaque machine. La contrainte (1.28) assure la cohérence entre les deux variables de précédence sur les machines. La contrainte (1.29) signifie que le nombre de précédences sur une machine  $m$  à l'étage  $k$  est égal au nombre d'opérations sur cette machine moins un. La contrainte (1.30) garantit que chaque opération débute à une date positive. La contrainte (1.31) garantit que les variables de décision sont binaires.

**Résultats :** Afin d'analyser les performances de ce modèle, nous l'avons testé avec le logiciel d'optimisation Xpress-MP, sur un PC Core 2 Duo' 3.16 GHz, avec les benchmarks de Vignier présentés au paragraphe précédent. Nous avons obtenu les résultats suivants.

Étages	$M_k$	$j5$		$j6$	
		(Wb)	(mixte)	(Wb)	(mixte)
$K=2$	(1 3)	0.51	0.48	272,48	26,77
	(3 1)	0.49	0.75	478,14	175,29
	(3 3)	0.41	2.46	2,69	2,36
$K=3$	(1 3 3)	1.26	0.87	>3600	700,67
	(3 3 1)	0.76	1.64	>3600	532,54
	(3 3 3)	0.69	0.78	6,00	6,03
	(3 1 3)	1.19	1.21	1884,85	110,37
$K=5$	(1 3 3 2 3)	46.32	3.44	>3600	>3600
	(3 3 2 3 1)	12.04	7.55	>3600	>3600
	(3 3 3 3 3)	76.09	17.68	>3600	746,76
	(3 3 1 2 2)	516.36	1.83	>3600	>3600

**Tableau 1-4. Temps de calcul moyens pour les problèmes de 5 et 6 jobs sans et avec blocage (en secondes).**

On peut constater sur le Tableau 1-4 que les résultats obtenus avec le modèle mathématique nous invitent à développer des méthodes approchées, car ce modèle n'est en mesure de nous donner des résultats en des temps raisonnables que pour des nombres de jobs inférieurs ou égaux à 6. Ce modèle a été présenté à la conférence INCOM 2012 (Trabelsi et *al.*, 2012).

#### 1.5.4 Méthodes approchées

La littérature propose de nombreuses heuristiques pour résoudre les problèmes d'ordonnancement de type flowshop hybrides, dont beaucoup, au départ, se sont particulièrement intéressées au cas particulier à 2 étages. Pour les problèmes à  $k$  étages, Hunsucker et Shah (1994) ont comparé six règles de priorité, SPT, LPT, FIFO, LIFO, MWR, et LWR pour la résolution de ce problème avec trois fonctions objectif différentes, le makespan, le temps moyen de passage et le temps maximal de passage. La supériorité de SPT (Shortest Processing Time first) a été démontrée pour la résolution des problèmes concernant le makespan ainsi que le temps moyen de passage. Trois algorithmes ont été développés pour la minimisation de la somme des avances et des retards dans un problème de type flowshop hybride (Fakhrzad et Heydari, 2008). Une heuristique basée sur six règles de priorité a été développée pour résoudre ce problème, avec la contrainte supplémentaire d'un partage de ressources renouvelables entre les étages (Figielska, 2014).

Presque toutes les méta-heuristiques ont été testées sur ces problèmes. La littérature est plutôt abondante et fournit des bons résultats avec des méthodes variées, comme les essaims de particules (Marichelvam et *al.*, 2020), un algorithme évolutionnaire multi objectif basé sur la décomposition (Zhang et *al.*, 2019), une colonie d'abeilles (Li et *al.*, 2019), ou encore une conception d'algorithme automatique (Alfaro-Fernandez et *al.*, 2020). Les algorithmes mémétiques permettent de combiner les avantages de l'exploration de l'espace des solutions grâce aux algorithmes évolutionnaires, avec ceux de l'exploitation grâce aux méthodes de recherche locale (Lei et *al.*, 2020).

**Contributions :** Les excellents résultats trouvés dans la littérature nous ont encouragés à travailler sur ces problèmes, avec des contraintes de blocage mixtes. Nous présentons ici les résultats que nous avons obtenus, avec les méthodes heuristiques et méta-heuristiques.

### **Notre apport - Heuristiques :**

Parmi les principales heuristiques issues de la littérature, nous avons choisi d'adapter l'heuristique NH, parce que c'est la plus efficace à notre connaissance (Thornton et Hunsucker, 2004). De plus, les résultats donnés par cette heuristique peuvent servir d'étalon pour évaluer la qualité des heuristiques que nous avons développées par ailleurs. Nous avons ainsi pu constater qu'elle est également la meilleure avec des conditions de blocage (Lozada Sanchez et *al.*, 2011). Au cours de ces travaux, nous avons testé cette heuristique avec d'autres sur des problèmes uniformes et non uniformes, et avons ainsi mis en évidence une faiblesse lorsque le nombre de machines sur chaque étage n'est pas uniforme.

Les autres heuristiques que nous avons construites sont basées sur les principales règles de priorité que l'on peut rencontrer dans la littérature (Hunsucker et Shah, 1994). Nous avons programmé respectivement les règles de priorité suivantes, SPT (Shortest Processing Time First), LPT (Longest Processing Time First), LWR (Longest Work Remaining time First), SWR (Shortest Work Remaining time First). Nous les avons adaptées aux différents cas de blocages, uniformes entre tous les étages ou mixtes. Pour chacune de ces règles, on calcule les temps correspondants à chaque job pour chaque somme d'étages possibles, à partir du début jusqu'à l'étage considéré pour SPT ou LPT, ou à partir de l'étage considéré jusqu'à la fin pour LWR et SWR, puis on garde l'ordonnancement donnant le meilleur résultat pour chacune de ces heuristiques. Dans la mesure où chacune de ces heuristiques est très rapide, il est possible de les regrouper dans une seule qui les teste toutes, l'une après l'autre, et fournit le meilleur résultat.

### **Notre apport - Méta-heuristiques :**

Nous avons choisi de développer les programmes en C++, et ainsi profiter de l'opportunité de définir des classes. Nos efforts de programmation sont non seulement capitalisés, mais nous garantissent aussi, au fur et à mesure du processus continu de validation de nos méthodes, des résolutions de problèmes affranchies des erreurs humaines identifiées au fil du développement. Nous avons développé les algorithmes « ElectroMagnetism-Like », le recuit simulé et un algorithme génétique afin de résoudre les problèmes de type flowshop classique. Le problème majeur de ces méthodes réside dans le fait que, pour le problème classique, la séquence définit trivialement l'ordonnancement, alors que dans le cas hybride, il faut également pouvoir décider sur quelle machine chaque job passe à chaque étage et dans quel ordre.

Le choix que nous avons fait est de ne pas coder un gène contenant la solution complète mais de lier la séquence complète à l'ordonnancement des jobs sur le premier étage. A partir de celui-là, nous construisons la solution complète, groupe d'étages par groupe d'étages, avec la règle suivante : premier sorti du groupe d'étages précédent, premier entré dans le groupe d'étages suivant. Les groupes d'étages sont établis de telle sorte que, lorsque l'on place les tâches d'un job sur le diagramme de Gantt, on les dispose sur le nombre minimal d'étages nécessaires à la connaissance des dates de disponibilité des machines utilisées par le job sur ce(s) étage(s). Ce nombre d'étages minimal constitue un groupe. En fonction de la suite des conditions de blocage, le nombre d'étages dans un groupe peut varier de 1 (si la première condition de blocage est  $Wb$ ) à tous les étages du flowshop.

Lorsque la condition de blocage pour le passage d'un étage au suivant est  $RCb$ , il est nécessaire, pour placer un nouveau job, de connaître l'ordonnancement partiel sur les 2 étages aval, afin de connaître la date à partir de laquelle on pourra commencer à le placer sur le premier étage. Lorsque la condition de blocage est du type  $RSb$  ou  $RCb^*$ , le même

raisonnement amène à ne considérer l'ordonnancement partiel que sur le seul étage aval. Enfin, lorsque le passage d'un étage au suivant est sans blocage ( $Wb$ ), on peut s'arrêter à cet étage, sauf s'il est déjà lié au suivant à cause de la condition de blocage précédente égale à  $RCb$ . Dès que les groupes d'étages sont constitués, il devient possible d'ordonnancer les jobs sur tous les étages, groupe d'étages par groupe d'étages. Sur l'exemple présenté sur la figure 1-8, la séparation entre les deux groupes d'étages est matérialisée par le trait pointillé entre les étages 2 et 3. La notion de groupe d'étages est illustrée par le groupe des tâches du job 4 sur le second groupe d'étages, et les contraintes qu'il pose sur les dates de disponibilité des machines des étages 3 à 5. En effet, on constate bien que la machine M3.2 reste bloquée jusqu'à ce que J4 commence son travail sur l'étage 5. Ainsi, on ne peut pas démarrer une nouvelle tâche sur la machine M3.2 avant cette date.

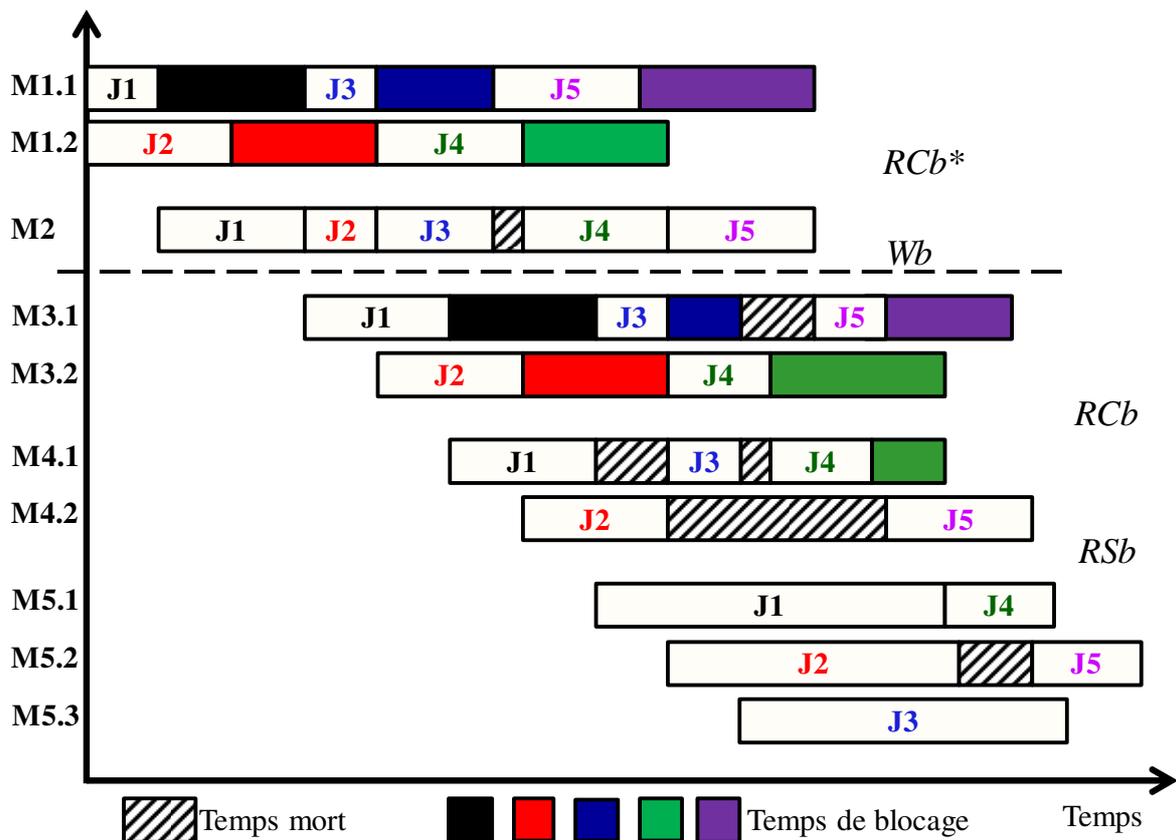


Figure 1-8. Exemple de flowshop hybride avec deux groupes d'étages.

Ce choix présente le double avantage de la simplicité et nous permet d'utiliser directement les méta-heuristiques que nous avons développées pour le cas classique. Il présente le désavantage apparent de ne permettre de visiter qu'une partie de l'ensemble des solutions. C'est cette façon d'ordonnancer que nous avons programmée dans la fonction d'évaluation que nous avons écrite spécialement pour les problèmes d'ordonnancement de type flowshop hybride avec blocages mixtes. Cette fonction d'évaluation a été testée avec chacune des trois méta-heuristiques que nous avons programmées pour l'étude du cas classique. Nous présentons les résultats dans les tableaux suivants.

**Résultats :** Les résultats expérimentaux, publiés dans (Trabelsi et al., 2013) montrent que l'heuristique qui regroupe les procédures SPT, LPT, SWR et LWR, bien qu'assez simple, donne des résultats très corrects et comparables à ceux que donne NH. Pour le cas du blocage mixte, nous avons également utilisé l'heuristique NH. Nous avons pu, là aussi, constater la qualité de cette heuristique ainsi que la bonne tenue des nôtres.

Nous présentons, dans les Tableaux 1-5 et 1-6, les résultats obtenus par nos heuristiques sur les benchmarks proposés dans (Vignier, 1997). Nous avons testé nos heuristiques sur le problème hybride sans contrainte de blocage, ainsi qu'avec une contrainte de blocage mixte composée de la séquence de contraintes suivante ( $RCb^*$ ,  $RSb$ ,  $RCb$ ,  $Wb$ ) pour  $K=5$ , la séquence ( $RCb^*$ ,  $RSb$ ) pour  $K=3$  et ( $RCb^*$ ) pour  $K=2$ .

La première colonne (Min) indique le résultat obtenu avec la valeur minimale des 4 heuristiques. La deuxième colonne (Min) donne le résultat obtenu si l'on ajoute l'heuristique NH aux 4 premières. La colonne (Rand) présente les résultats obtenus lorsque l'on teste une séquence générée aléatoirement. Pour chacun des problèmes, les temps de calcul de chacune des heuristiques est totalement négligeable (inférieur à la seconde). Nous avons donc choisi de ne pas les indiquer sur les Tableaux 1-5 et 1-6.

Etages	Machines par étage	j 5						j 10						j 15					
		SPT	LWR	Min	NH	Min	Rand	SPT	LWR	Min	NH	Min	Rand	SPT	LWR	Min	NH	Min	Rand
$K=2$	(1 3)	4,47	0,00	<b>0,00</b>	2,47	<b>0,00</b>	5,97	3,69	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	6,06	3,40	0,00	<b>0,00</b>	0,13	<b>0,00</b>	2,60
	(3 1)	0,00	8,32	<b>0,00</b>	3,70	<b>0,00</b>	9,51	0,00	3,26	<b>0,00</b>	0,19	<b>0,00</b>	2,19	0,00	1,64	<b>0,00</b>	0,53	<b>0,00</b>	2,16
	(3 3)	8,29	2,73	<b>2,73</b>	7,80	<b>2,73</b>	8,81	21,34	7,67	7,67	11,31	<b>6,44</b>	26,27	11,27	6,94	<b>5,90</b>	19,95	<b>5,90</b>	15,81
$K=3$	(1 3 3)	4,54	0,00	<b>0,00</b>	0,93	<b>0,00</b>	7,50	2,79	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	6,88	2,15	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	6,34	
	(3 3 1)	0,95	4,92	<b>0,95</b>	2,86	<b>0,95</b>	11,55	0,00	3,63	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	5,31	0,00	6,79	<b>0,00</b>	0,26	<b>0,00</b>	6,69	
	(3 3 3)	12,78	0,51	<b>0,51</b>	1,82	<b>0,51</b>	5,15	21,38	11,65	10,86	9,62	<b>9,28</b>	20,50	13,42	9,24	8,94	<b>6,40</b>	<b>6,40</b>	17,51
	(3 1 3)	2,17	5,02	1,57	0,71	<b>0,00</b>	8,34	0,18	0,71	0,18	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	1,06	3,75	2,34	1,67	0,77	<b>0,42</b>	6,60
$K=5$	(1 3 3 2 3)	5,12	0,23	<b>0,23</b>	2,73	<b>0,23</b>	7,59	7,98	1,08	<b>1,08</b>	3,56	<b>1,08</b>	7,18	2,70	0,00	<b>0,00</b>	0,44	<b>0,00</b>	5,27
	(3 3 2 3 1)	0,53	8,72	<b>0,53</b>	<b>0,53</b>	<b>0,53</b>	13,11	1,12	4,47	1,12	0,74	<b>0,56</b>	11,10	0,28	5,13	<b>0,28</b>	0,39	<b>0,28</b>	5,02
	(3 3 3 3 3)	4,03	0,69	<b>0,69</b>	<b>0,69</b>	<b>0,69</b>	4,52	13,32	9,33	9,05	<b>6,91</b>	<b>6,91</b>	21,18	17,53	16,45	15,98	11,62	<b>11,38</b>	22,93
	(3 3 1 2 2)	6,89	4,10	3,83	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	6,64	1,40	4,39	1,10	<b>0,33</b>	<b>0,33</b>	8,71	0,69	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	2,78

Tableau 1-5. Taux d'erreur des différentes heuristiques pour le cas sans blocage.

Etages	Machines par étage	j 5						j 10						j 15					
		SPT	LWR	Min	NH	Min	Rand	SPT	LWR	Min	NH	Min	Rand	SPT	LWR	Min	NH	Min	Rand
$K=2$	(1 3)	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,00
	(3 1)	0,00	11,10	<b>0,00</b>	3,70	<b>0,00</b>	5,11	0,19	3,46	<b>0,19</b>	0,37	<b>0,19</b>	1,81	0,41	2,60	0,41	1,07	<b>0,28</b>	3,15
	(3 3)	4,19	0,00	<b>0,00</b>	0,54	<b>0,00</b>	4,42	17,25	11,32	<b>11,32</b>	13,60	<b>11,32</b>	11,83	3,63	1,17	<b>0,47</b>	1,73	<b>0,47</b>	5,50
$K=3$	(1 3 3)	3,53	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	3,01	0,95	0,00	<b>0,00</b>	0,25	<b>0,00</b>	0,79	0,13	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	1,73
	(3 3 1)	1,85	4,38	<b>1,85</b>	2,31	<b>1,85</b>	6,28	0,22	3,87	<b>0,22</b>	<b>0,22</b>	9,73	0,15	7,85	0,15	0,26	<b>0,00</b>	8,61	
	(3 3 3)	16,44	0,00	<b>0,00</b>	1,04	<b>0,00</b>	1,60	20,27	9,59	<b>9,59</b>	10,49	<b>9,59</b>	20,07	7,06	3,36	3,36	3,47	<b>2,78</b>	9,72
	(3 1 3)	2,88	5,38	2,28	<b>0,71</b>	<b>0,71</b>	10,46	0,18	0,71	0,18	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	1,24	5,17	3,28	2,90	2,75	<b>2,07</b>	7,02
$K=5$	(1 3 3 2 3)	2,36	0,00	<b>0,00</b>	1,26	<b>0,00</b>	6,07	4,85	0,00	<b>0,00</b>	0,41	<b>0,00</b>	2,82	1,23	0,00	<b>0,00</b>	0,07	<b>0,00</b>	2,20
	(3 3 2 3 1)	3,88	9,60	3,88	2,87	<b>2,18</b>	18,52	8,39	11,37	8,39	7,83	<b>7,22</b>	16,86	12,75	16,86	11,72	12,78	<b>11,61</b>	22,48
	(3 3 3 3 3)	6,20	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	5,48	20,24	9,60	9,60	9,94	<b>8,97</b>	18,84	9,31	5,78	5,28	<b>3,67</b>	<b>3,67</b>	15,13
	(3 3 1 2 2)	3,52	3,05	2,67	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	6,30	1,07	3,11	0,98	<b>0,30</b>	<b>0,30</b>	6,22	0,39	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	1,17

Tableau 1-6. Taux d'erreur des différentes heuristiques pour le cas avec blocage mixte.

On peut tirer de la lecture des Tableaux 1-5 et 1-6 que, lorsque la machine goulot est au premier étage, la meilleure heuristique est toujours LWR. Elle est toujours supérieure à l'heuristique NH. Nous expliquons cette constatation par la remarque suivante. On doit faire passer en premier sur la machine du premier étage les jobs pour lesquels le temps qui reste à passer est le plus grand, car le nombre de machines par étages sur les étages aval n'est pas limitant.

De même, lorsque la machine goulot est au dernier étage, la meilleure heuristique est presque toujours SPT. NH ne lui est supérieure que pour le cas avec 10 jobs et 5 étages. Nous pouvons expliquer cette constatation par la remarque suivante. L'ordre dans lequel il semble judicieux de faire passer les jobs sur la dernière machine est l'ordre croissant des temps de travaux sur l'ensemble des étages précédents, dans la mesure où le nombre de machines n'y est pas un facteur limitant.

Pour les cas dans lesquels la machine goulot est placée à l'étage central, les conclusions sont beaucoup plus nuancées, car aucune heuristique parmi celles que nous avons proposées ne semble montrer de supériorité évidente, même NH. On commence à retrouver l'intérêt de multiplier les angles d'attaque, car la performance globale est supérieure à la performance de chacune des deux heuristiques principales, prises une par une.

Enfin, pour les cas où le nombre de machines par étage est uniforme, LRT est la meilleure des 4 heuristiques, mais NH lui devient supérieure assez rapidement, dès que le nombre d'étages devient supérieur ou égal à trois.

Pour le cas particulier du blocage mixte, présenté Tableau 1-6, les remarques que nous avons faites plus haut restent globalement valables, mais doivent être modulées en fonction des constats suivants.

On peut constater que le fait d'associer ces quatre heuristiques améliore le résultat global. Même si cette amélioration est faible, elle ne coûte rien car ces heuristiques sont très rapides. Globalement, les résultats obtenus avec toutes les heuristiques sont meilleurs sur les problèmes avec blocage mixte que pour le problème sans blocage. Cela confirme, grâce à l'expérience, les résultats de complexité que nous connaissons.

L'heuristique NH se montre globalement efficace, et semble plus pertinente à mesure que le nombre d'étages augmente. Elle est autant à l'aise sur des problèmes avec blocage mixte que sans blocage. Par contre, elle est aussi mise en difficulté par les problèmes pour lesquels le nombre de machines par étages est uniforme.

Ces problèmes semblent être les plus compliqués à résoudre. En effet, la configuration du problème n'offre pas d'angle d'attaque « propre au problème ». Dans ces cas, il est difficile d'adopter une stratégie de placement de jobs à priori et c'est ce qui, selon nous, rend la tâche particulièrement difficile à toutes les heuristiques, y compris les plus performantes, comme NH.

Du côté des méta-heuristiques, nous avons travaillé sur les mêmes benchmarks, sans contrainte d'une part et avec la séquence de contraintes suivante (*RCb\**, *RSb*, *RCb*, *Wb*) d'autre part. Les Tableaux 1-7 et 1-8 présentent les résultats respectifs. Pour chaque problème traité, les colonnes portent le nom de la méta-heuristique dont elles présentent les résultats. La programmation a été réalisée en langage C++ et les programmes ont été exécutés sur un PC Core 2 Duo' 3.16 GHz. Ces résultats sont obtenus pour des temps de calcul tout à fait acceptables pour des méta-heuristiques, car ils ne dépassent pas les 3 secondes pour les plus gros problèmes traités dans ce benchmark. Nous avons choisi de ne pas les indiquer sur les Tableaux 1-7 et 1-8.

Les paramètres utilisés pour l'obtention des résultats présentés sont les suivants. Pour l'algorithme EM-like, nous avons utilisé des populations de 30 particules pour obtenir les résultats présentés dans le Tableau 1-7. Pour chaque particule, l'amélioration locale basée sur NEH dans le cas simplifié non hybride a été testé, puis un autre voisinage pris au hasard afin d'échapper aux optima locaux. Le paramètre de recherche locale a été fixé à 0,8. Le nombre d'itérations maximal a été limité à 40.

Les paramètres de l'algorithme de recuit simulé ont été fixés de la façon suivante : une température initiale de 1100K, une température finale de 0,9K, un rapport entre deux températures successives de 0,96 et à chaque température, la possibilité de faire appel à deux voisinages. Les voisinages possibles sont l'amélioration locale NEH ainsi que le choix parmi quelques voisinages classiques, permettant de sortir des optima locaux.

Pour l'algorithme génétique, nous avons utilisé les mêmes pourcentages que ceux que nous avons déterminés dans le cas classique, c'est-à-dire 10% de conservation des meilleurs individus, 10% de nouveaux, 60% issus du croisement et 20% de la mutation composent la population suivante. La valeur du critère d'arrêt reste le nombre de populations successives sans amélioration  $ctbvi = 500$ . Nous avons fixé le nombre d'individus dans chaque population à 100. Ces ensembles de paramètres ont été déterminés après une étude de sensibilité.

Etages	Machines par étage	j 5				j 10				j 15			
		H	EML	SA	GA	H	EML	SA	GA	H	EML	SA	GA
K=2	(1 3)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	(3 1)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	(3 3)	2,73	0,00	0,88	0,00	6,44	<b>2,34</b>	4,63	<b>2,34</b>	5,90	<b>1,51</b>	4,16	1,58
K=3	(1 3 3)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	(3 3 1)	0,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	(3 3 3)	0,51	0,00	1,38	0,00	9,28	4,67	7,33	<b>3,93</b>	6,40	<b>2,30</b>	4,66	2,85
	(3 1 3)	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	0,00	1,38	0,00
K=5	(1 3 3 2 3)	<b>0,23</b>	0,00	0,00	0,00	1,08	<b>0,18</b>	2,64	<b>0,18</b>	0,00	0,00	0,25	0,00
	(3 3 2 3 1)	0,53	0,00	0,53	0,00	0,56	0,00	1,69	0,00	0,28	0,00	0,41	0,00
	(3 3 3 3 3)	<b>0,69</b>	1,01	1,97	1,01	6,91	3,04	6,06	<b>2,76</b>	11,38	<b>6,98</b>	10,12	8,00
	(3 3 1 2 2)	<b>0,00</b>	4,76	5,82	4,76	0,33	<b>0,00</b>	0,93	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00

Tableau 1-7. Taux d'erreur des méta-heuristiques pour le cas sans blocage.

Etages	Machines par étage	j 5				j 10				j 15			
		H	EML	SA	GA	H	EML	SA	GA	H	EML	SA	GA
K=2	(1 3)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	(3 1)	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,19</b>	<b>0,19</b>	0,37	<b>0,19</b>	0,28	0,00	0,00	0,00
	(3 3)	0,00	0,00	0,00	0,00	11,32	<b>6,21</b>	6,52	<b>6,21</b>	0,47	0,00	0,00	0,00
K=3	(1 3 3)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	(3 3 1)	1,85	<b>0,46</b>	0,46	<b>0,46</b>	<b>0,22</b>	<b>0,22</b>	<b>0,22</b>	<b>0,22</b>	0,00	0,00	0,00	0,00
	(3 3 3)	0,00	0,00	0,00	0,00	9,59	6,90	7,43	<b>6,62</b>	2,78	<b>0,00</b>	0,83	0,19
	(3 1 3)	0,71	<b>0,35</b>	0,64	<b>0,35</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	2,07	0,28	0,57	<b>0,00</b>
K=5	(1 3 3 2 3)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	(3 3 2 3 1)	2,18	<b>1,46</b>	1,67	<b>1,46</b>	7,22	2,73	3,51	<b>2,42</b>	11,61	7,38	8,39	<b>5,02</b>
	(3 3 3 3 3)	0,00	0,00	0,00	0,00	8,97	7,19	8,29	<b>6,98</b>	3,67	2,11	2,87	<b>1,83</b>
	(3 3 1 2 2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tableau 1-8. Taux d'erreur des méta-heuristiques pour le cas avec blocage mixte.

Alors que, pour les heuristiques, nous n'avons pas constaté de grosses différences entre le traitement du cas sans blocage et des cas avec conditions de blocage mixte, il semble que l'algorithme utilisé ait une influence dans le cas des méta-heuristiques. Cependant, toutes les méta-heuristiques donnent de bons résultats.

L'algorithme génétique prend l'avantage sur le cas avec blocage mixte. Pour l'application sur des problèmes réels, il nous semble le mieux indiqué, car le temps de traitement des informations sur la population dans l'algorithme EM-Like est de plus en plus coûteux en temps de calcul à mesure que le nombre d'informations par individu (particule) augmente. Ce temps augmente également pour les autres méthodes, comme l'algorithme génétique, mais la difficulté des opérations est moindre.

L'apport principal des méta-heuristiques sur la résolution des problèmes hybrides est l'avancée significative qu'elles permettent, en termes de précision, sur les problèmes pour

lesquels la répartition du nombre de machines par étages est uniforme. Nous avons vu que c'est sur ce point qu'achoppent le plus les heuristiques. C'est donc sur ces problèmes que la méthode d'exploration de l'espace des solutions semble le mieux mise en évidence. En effet, l'algorithme de recuit simulé semble toujours plus en difficulté sur ces problèmes dont nous savons qu'ils sont les plus compliqués à résoudre. Ses performances se rapprochent de celles des heuristiques, alors que les algorithmes à base d'évolution de populations réussissent significativement mieux.

Enfin, bien que tous ces algorithmes donnent de bons résultats, il faut se souvenir que leur utilisation ne nous permet de nous déplacer que dans un sous espace des solutions. Malgré tout, cette méthode est validée par le fait que nous avons amélioré les meilleures solutions connues aux plus gros problèmes de Vignier avec cette méthode.

## 1.6 Flowshop Hybride avec machines parallèles non identiques

Depuis 2017, j'ai proposé un projet qui vise à réduire les coûts et des délais, grâce à une utilisation optimale des moyens de production disponibles. Ce projet prend en compte de nouvelles contraintes industrielles dans l'optimisation de l'ordonnancement de systèmes de production flexibles avec blocage, les machines parallèles non-identiques.

Les problèmes à base de machines non-identiques sont de deux natures, uniformes (*uniform*) et quelconques (*unrelated*). Dans chacun de ces deux cas, les machines permettent de traiter des opérations identiques en des temps opératoires différents en fonction de la machine choisie pour les réaliser. La différence se situe au niveau du comportement des machines par rapport aux produits. Dans le cas uniforme, le rapport entre deux temps de traitement sur deux machines différentes pour une opération donnée est le même d'une machine à l'autre pour tous les produits. Dans le cas quelconque, au contraire, ce rapport entre les temps de traitement entre une machine et l'autre peut être différent d'un produit à l'autre, ce qui revient à considérer des cas où certaines machines sont mieux qualifiées que d'autres pour traiter certaines opérations. Pour ces problèmes, comme la rapidité des machines d'un même étage peut être différente, le choix de la machine sur laquelle passe un job devient un élément important de la résolution du problème.

Nous avons proposé un modèle mathématique qui résout les problèmes de type flowshop hybride avec contraintes de blocage mixte, dans le cas quelconque de machines parallèles non identiques. Comme ce problème d'ordonnancement est NP-difficile et que les logiciels de traitement des modèles mathématiques n'ont qu'une portée limitée pour apporter une solution exacte à une application industrielle, nous avons parallèlement développé des heuristiques dédiées au problème, dont nous avons pu vérifier la qualité par rapport aux solutions exactes fournies par les modèles mathématiques (Pacheco et al., 2017).

Par ailleurs, nous avons également adapté l'algorithme génétique que nous développons au laboratoire à ce nouveau problème avec des premiers résultats encourageants.

En conclusion, ce projet nous permet de développer des nouveaux modèles mathématiques répondant à des nouvelles problématiques émergentes. Les heuristiques et méta-heuristiques que nous avons développées ont prouvé leur utilité. J'ai exercé la responsabilité du projet d'intérêt régional sur ce projet, que j'ai rédigé et défendu devant la commission d'évaluation à Nancy, afin d'obtenir le soutien financier de la région Grand-Est. J'ai enfin rendu compte de ce travail auprès de nos financeurs. Les outils dont nous poursuivons le développement permettront aussi la collaboration avec les partenaires industriels grand-régionaux intéressés par la résolution de ces problèmes dans leurs entreprises.

## 1.7 Conclusion et contribution scientifique

Nous avons présenté dans ce chapitre les contraintes de blocage auxquelles nous nous sommes intéressés, ainsi que nos contributions à la résolution des problèmes d'ordonnancement de type flowshop classique et hybride, soumis à des contraintes de blocage mixtes.

Nous avons développé, pour chacun des problèmes que nous avons abordés, un modèle mathématique linéaire en nombres entiers, des bornes inférieures et des méthodes approchées, dont nous avons pu démontrer la qualité, soit par rapport à la résolution du modèle mathématique, soit en améliorant parfois les meilleures solutions connues.

Le développement de nos méthodes de résolution sous forme de classes nous permet de ne les programmer qu'une seule fois et à un seul endroit. Les gains sont multiples : en temps de développement, en capitalisation de méthodes, en qualité de résultat global, mais aussi en termes de qualité d'accueil de nos étudiants. En effet, lorsqu'un nouvel étudiant vient en stage sur nos méthodes, il a accès à toute la puissance des méthodes que nous avons développées avant son arrivée, lui facilitant ainsi le développement des siennes. Dans le cas du passage au problème hybride, elles nous ont de plus inspiré la fonction d'évaluation qui permet d'utiliser les méthodes d'optimisation classiques.

Les heuristiques que nous avons développées sont très rapides, et leur précision est comparable à celle des méta-heuristiques. Quelques cas existent pour lesquels les heuristiques battent les méta-heuristiques. Nous n'oublions donc jamais, lorsque l'on travaille sur des méta-heuristiques, que les heuristiques peuvent être très utiles.

Pour répondre aux verrous scientifiques auxquels nous nous sommes attaqués, nous avons :

- Étudié la complexité des problèmes de type flowshop sous contraintes de blocage mixtes.
- Développé des bornes inférieures qui s'adaptent aux problèmes mixtes étudiés.
- Proposé un modèle mathématique du problème, classique et hybride, en vue de sa résolution dans un logiciel de programmation linéaire en nombres entiers.
- Créé de nouvelles heuristiques qui s'appuient sur les particularités des contraintes de blocage d'une part, et l'adaptation d'heuristiques existantes au problème avec contraintes de blocage mixtes d'autre part.
- Utilisé des fonctions d'évaluation qui permettent l'adaptation des principales méthodes méta-heuristiques (algorithme génétique, recuit simulé, ...) à la nature particulière du problème avec les contraintes de blocage. Pour le problème hybride, les expériences menées pour la validation de cette méthode nous ont permis d'améliorer les meilleures solutions connues pour le problème sans blocage.



## Chapitre 2 : Problèmes de type Jobshop

### 2.1 Introduction

Les problèmes de type jobshop apparaissent lorsque la succession des opérations diffère d'un travail à un autre, comme la figure 2-1 l'illustre sur un petit exemple.

#### Définition du problème

Un problème de type jobshop est composé d'un ensemble de  $N$  jobs, composés chacun de  $N_i$  opérations, qui doivent passer sur  $N_i$  ressources (machines, hommes, ...) **dans un ordre propre à chacun de ces jobs**. Une ressource ne peut exécuter qu'une seule opération à la fois et sans interruption. A chaque instant, chaque job ne peut avoir qu'une seule opération en cours de réalisation. Toutes les ressources sont disponibles à l'instant initial. Par ailleurs, la préemption n'est pas autorisée. La figure 2-1 présente le diagramme de Gantt d'un ordonnancement pour un problème de type jobshop avec 4 jobs et 3 machines, dont les gammes opératoires sont les suivantes :

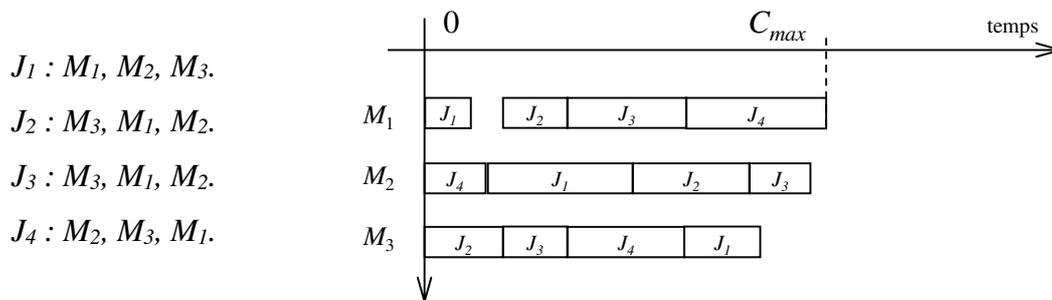


Figure 2-1. Diagramme de Gantt pour un jobshop à 4 jobs et 3 machines.

Dans le cas des problèmes d'ordonnancement de type jobshop, parfois aussi appelés problèmes d'ateliers à cheminements multiples, l'ordre des machines (ou des étages) sur lesquels doit passer un job lui est propre. Cet ordre, souvent appelé gamme opératoire, est donc, par définition, différent d'un job à l'autre. C'est cette particularité qui caractérise les problèmes de type jobshop et qui fait leur intérêt du point de vue des applications industrielles. On rencontre ce type de problèmes lorsque la production est organisée sous forme d'îlots, autonomes les uns par rapport aux autres. Lorsqu'on ne dispose que d'une seule machine pour la réalisation d'une opération donnée, le problème est qualifié de jobshop classique. Lorsqu'il existe au moins une opération pour laquelle on dispose de plusieurs machines, on parle de jobshop hybride. L'ensemble de ces machines est alors qualifié d'étage.

Au cours de nos travaux, nous nous sommes aussi intéressés aux problèmes de type jobshop classique et hybride, avec la prise en compte de contraintes de blocage mixtes. Dès que l'on s'intéresse à des jobshop avec contraintes de blocage, on peut rencontrer des situations de conflits, par exemple lors du croisement de deux tâches sur deux machines. Ces situations de conflit ont été décrites dans (Trabelsi et al., 2009), et elles n'ont rien à voir avec les contraintes de blocage que nous avons définies dans le premier chapitre.

Comme dans le chapitre précédent, nous nous intéresserons successivement à la complexité, aux bornes inférieures puis aux méthodes exactes et approchées que nous avons développées.

## 2.2 Contribution méthodologique et verrous scientifiques

L'approche méthodologique qui a été présentée pour les flowshops demeure la même sur les problèmes de type job shop et les verrous scientifiques sur lesquels nous nous sommes concentrés sont donc semblables à ceux considérés dans le chapitre précédent.

L'approche méthodologique qui est la nôtre des problèmes d'ordonnancement nous permet donc d'attaquer les verrous scientifiques posés par les problèmes de type job shop, classique et hybride, avec contraintes de blocage mixtes entre les opérations.

## 2.3 Jobshop Classique

Dans un problème de type jobshop classique, on considère qu'il n'existe qu'une seule machine par opération considérée. L'importance théorique de leur modélisation, ainsi que l'applicabilité industrielle de ces problèmes, les fait compter parmi les plus étudiés dans la littérature (Jain et Meeran, 1999).

Les problèmes de type jobshop avec contraintes de blocage ont été relativement peu étudiés. Banaszak et Krogh (1990) ont été parmi les premiers à travailler sur un problème de type industriel avec une contrainte de blocage de type *RSb* entre deux étages successifs et ont proposé une heuristique pour la résolution de ce problème. Le problème de l'ordonnancement des trains dans un réseau de transports a été modélisé (Lange et Werner, 2018). Quatre formulations mathématiques ont été proposées et testées sur des exemples allant jusqu'à 20 jobs et 11 machines et comparées en termes de retard total, de taille de formulation et de temps de calcul. Au sujet du problème de type jobshop avec la contrainte de blocage de type *RCb*, Wajdi Trabelsi s'est attaché à définir les conditions d'apparition de conflits entre tâches dûs aux contraintes de blocage, puis à trouver des méthodes permettant de les repérer afin de les éviter (Trabelsi, 2009). Nous avons récemment publié le modèle mathématique du jobshop classique avec contraintes de blocage mixtes, ainsi qu'une fonction d'évaluation qui nous permet une résolution de ces types de problèmes avec des méthodes méta-heuristiques, et qui garantit l'absence de conflit entre tâches, c'est-à-dire une solution viable (Sauvey et al., 2020).

### 2.3.1 Complexité

Comme les problèmes de type jobshop sont une généralisation des problèmes de type flowshop, on comprend aisément pourquoi leur complexité est supérieure à ces derniers, et donc pourquoi ils sont généralement considérés comme NP-difficiles.

Seuls deux cas particuliers peuvent être classés parmi les cas polynomiaux, ceux à deux jobs (Sotskov, 1985), (Brucker, 1988) ainsi que ceux à deux machines (Jackson, 1956). Les problèmes avec 3 jobs sont tous NP-difficile (Sotskov et Shakhlevich, 1995).

### 2.3.2 Bornes inférieures

La littérature propose des bornes inférieures efficaces pour les problèmes de type jobshop classiques. En 1989, Carlier et Pinson ont proposé une approche avec la mesure des têtes et des queues de chaque job au moment de son passage sur une machine donnée, qu'ils ont approfondie en 1994. Applegate et Cook (1991) ont recensé plusieurs plans de coupe (simple, avec 2 jobs, avec cliques, 2jobs/2machines, en triangle, etc.) afin d'en tirer une borne

inférieure pour un algorithme de séparation et d'évaluation, ainsi que quelques heuristiques. Brucker et Jurisch (1993) ont proposé une autre approche basée sur la relaxation du problème à deux jobs qui peut être résolue efficacement par des méthodes géométriques. Cette borne améliore les résultats des bornes classiques lorsque le nombre de machines est beaucoup plus grand que le nombre de jobs. Trois bornes inférieures qui prennent en considération des groupes d'opérations permutable et les temps de fin de chacune, dans le meilleur des cas ont été proposées dans (Pinot et Mebarki, 2008). Récemment, une borne inférieure à ce problème basé sur le problème de coloration graphique a été proposée pour le problème de type jobshop avec un étage d'assemblage (Daneshamoz et Behnamian, 2018).

**Contributions :** Nous avons proposé deux bornes inférieures pour les problèmes de type jobshop, avec la contrainte de blocage de type *RCb*. Ces bornes inférieures ont été développées par Ali Gorine lors de ses travaux de doctorat (Gorine, 2011).

La première borne inférieure ( $Binf_1$ ) que nous avons adaptée est celle qui s'appuie sur le temps de travail maximal des ressources. Elle suppose qu'une machine est occupée pendant un temps au moins égal à la somme des temps pour lesquels son utilisation est prévue en tenant compte des blocages. On ajoute ensuite deux autres temps, le temps minimal en lequel un job peut arriver sur cette machine, ainsi que le temps minimal que peut mettre un job quittant cette machine avant de quitter l'atelier. La seconde borne inférieure ( $Binf_2$ ) s'appuie sur les temps d'opérations des jobs, et est fondée sur les travaux menés par Carlier et Pinson (1989). Elle repose sur le fait que si deux opérations ont lieu sur la même machine, alors l'une est forcément ordonnancée avant l'autre, et les différences entre les temps précédant ou succédant à ces opérations. Partant du principe que toutes les opérations doivent être exécutées sur toutes les machines, on peut tirer de ces observations une bonne inférieure de qualité.

Dans la littérature, nous n'avons pas trouvé trace d'autres travaux proposant des bornes inférieures au problème d'ordonnancement de type job-shop avec contraintes de blocages mixtes.

**Résultats :** Les résultats que nous avons obtenus avec ces bornes inférieures sont logiques, mais assez inégaux, en fonction du nombre de jobs et de machines considérés. Pour les problèmes à 5 machines, la borne  $Binf_1$  donne des résultats autour de 5%, alors que pour les problèmes à 100 machines, la borne  $Binf_2$  donne des résultats autour de 2%. Pour tous les autres problèmes sur lesquels nous avons travaillé, la précision de ces bornes est trop souvent supérieure à 15%, ce qui compromet l'efficacité des méthodes exactes qui pourraient être développées sur leurs bases. Cependant, leur temps de calcul est toujours inférieur à une seconde par problème.

### 2.3.3 Méthodes exactes

De nombreuses méthodes exactes ont été utilisées pour résoudre les problèmes d'ordonnancement de type jobshop classique. Une présentation détaillée et très fournie des différentes méthodes, exactes ou approchées, qui ont été utilisées sur ces problèmes, est disponible dans (Jain et Meeran, 1999). Cet article est une référence particulièrement précieuse pour toute personne cherchant à s'attaquer au problème de type jobshop, grâce aux 263 références qu'il cite, parmi lesquelles 58 qui proposent des méthodes exactes. Depuis, une hybridation des méthodes de programmation linéaire et de programmation par contraintes a été proposée pour le problème couplé jobshop/emploi du temps des employés (Artigues et al., 2009).

**Contributions** : Pour un jobshop, le blocage mixte se caractérise par la possibilité de choisir, pour chaque tâche de chaque job, la contrainte de blocage qui s'exécutera à sa suite. Nous avons développé un modèle mathématique permettant la prise en compte de contraintes de blocage mixtes. Pour cela, nous nous sommes inspirés des formulations de Mati (2002) et Martinez (2005). Le modèle proposé prend comme variables les dates de début des opérations. Pour définir les contraintes de blocage succédant à chacune des opérations, nous avons défini une matrice de blocages, composée d'autant de lignes que le problème contient de jobs et d'autant de colonnes que le nombre maximal d'opérations à traiter par job moins une, la dernière opération étant par définition sans blocage (Sauvey et al., 2015a). Nous avons arbitrairement fixé le nombre maximal d'opérations que doit subir un job au nombre de machines du problème.

Les paramètres du modèle mathématique sont les suivants :

$N$  : Nombre de jobs.

$M$  : Nombre de machines. Dans ce modèle, le nombre de machines est également le nombre maximal d'opérations traitées par le travail.

$N_i$  : Nombre d'opérations du job  $J_i$ .

$O_{i,j}$  :  $j^{\text{ème}}$  opération du job  $J_i$ .

$O_i = \{O_{i,1} ; O_{i,2} ; \dots ; O_{i,n_i}\}$  : Ensemble des opérations du job  $J_i$ .

$P_{i,j}$  : Temps d'exécution de l'opération  $O_{i,j}$ .

$M_{i,j}$  : Machine utilisée pour effectuer l'opération  $O_{i,j}$ .

$\lambda$  : Constante suffisamment grande.

$L0_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } j \leq n_i - 2 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$ ,  $L0_{i,j}=1$  si  $O_{i,j}$  n'est ni la dernière, ni l'avant dernière opération de  $J_i$ .

$L1_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } j = n_i - 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$ ,  $L1_{i,j}=1$  si  $O_{i,j}$  est l'avant dernière opération de  $J_i$ .

$L2_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } j = n_i \\ 0 & \text{else} \end{cases}$ ,  $L2_{i,j}=1$  si  $O_{i,j}$  est la dernière opération de  $J_i$ .

$Bk_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si après } O_{i,j} \text{ la contrainte de blocage } k \text{ est valide} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$ ,

avec  $k = 0$  ( $Wb$ ),  $1$  ( $RSb$ ),  $2$  ( $RCb^*$ ), ou  $3$  ( $RCb$ ).

Les variables de décision sont les suivantes :

$Y_{i,j,i,l,j,l}$  : est égale à 1 si l'opération  $O_{i,j}$  utilise la même machine que l'opération  $O_{i,l,j,l}$ .

$S_{i,j}$  : Date de début de l'opération  $O_{i,j}$ .

$C_{max}$  : Makespan ou date de fin maximale du problème d'ordonnancement.

Les équations du modèle mathématique sont les suivantes :

$$\text{Min } C_{\max} \quad 2.1$$

Avec les contraintes suivantes :

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} \quad 2.2$$

$$S_{ij} \geq S_{i(j-1)} + P_{i(j-1)}, \forall i \in [1, \dots, N], \forall j \in [1, \dots, N_i] \quad 2.3$$

$$C_{\max} \geq S_{in_i} + P_{in_i}, \forall i \in [1, \dots, N] \quad 2.4$$

$$\begin{aligned} S_{ij} \geq & [S_{i(j+2)} \cdot L0_{ij} + (S_{i(j+1)} + P_{i(j+1)}) \cdot L1_{ij} + (S_{ij} + P_{ij}) \cdot L2_{ij} - \lambda \cdot Y_{ijij}] \cdot B3_{ij} \\ & + [(S_{i(j+1)} + P_{i(j+1)}) \cdot (L1_{ij} + L0_{ij}) + (S_{ij} + P_{ij}) \cdot L2_{ij} - \lambda \cdot Y_{ijij}] \cdot B2_{ij} \\ & + [S_{i(j+1)} \cdot (L1_{ij} + L0_{ij}) + (S_{ij} + P_{ij}) \cdot L2_{ij} - \lambda \cdot Y_{ijij}] \cdot B1_{ij} \\ & + [S_{ij} + P_{ij} - \lambda \cdot Y_{ijij}] \cdot B0_{ij}, \\ & \forall i, i_1 \in [1, \dots, N], \forall j \in [1, \dots, N_i], \forall j_1 \in [1, \dots, N_i - 2] \end{aligned} \quad 2.5$$

$$\begin{aligned} S_{i_j} \geq & [S_{i(j+2)} \cdot L0_{ij} + (S_{i(j+1)} + P_{i(j+1)}) \cdot L1_{ij} + (S_{ij} + P_{ij}) \cdot L2_{ij} - \lambda \cdot (1 - Y_{ijij})] \cdot B3_{ij} \\ & + [(S_{i(j+1)} + P_{i(j+1)}) \cdot (L1_{ij} + L0_{ij}) + (S_{ij} + P_{ij}) \cdot L2_{ij} - \lambda \cdot (1 - Y_{ijij})] \cdot B2_{ij} \\ & + [S_{i(j+1)} \cdot (L1_{ij} + L0_{ij}) + (S_{ij} + P_{ij}) \cdot L2_{ij} - \lambda \cdot (1 - Y_{ijij})] \cdot B1_{ij} \\ & + [S_{ij} + P_{ij} - \lambda \cdot (1 - Y_{ijij})] \cdot B0_{ij}, \\ & \forall i, i_1 \in [1, \dots, N], \forall j \in [1, \dots, N_i - 2], \forall j_1 \in [1, \dots, N_i] \end{aligned} \quad 2.6$$

$$\begin{aligned} S_{ij} \geq & [(S_{i(j+1)} + P_{i(j+1)}) \cdot L1_{ij} + (S_{ij} + P_{ij}) \cdot L2_{ij} - \lambda \cdot Y_{ijij}] \cdot B3_{ij} \\ & + [(S_{i(j+1)} + P_{i(j+1)}) \cdot L1_{ij} + (S_{ij} + P_{ij}) \cdot L2_{ij} - \lambda \cdot Y_{ijij}] \cdot B2_{ij} \\ & + [(S_{i(j+1)} \cdot L1_{ij} + (S_{ij} + P_{ij}) \cdot L2_{ij} - \lambda \cdot Y_{ijij})] \cdot B1_{ij} \\ & + [(S_{ij} + P_{ij}) - \lambda \cdot Y_{ijij}] \cdot B0_{ij}, \\ & \forall i, i_1 \in [1, \dots, N], \forall j \in [1, \dots, N_i], \forall j_1 \in [1, \dots, N_i - 1] \end{aligned} \quad 2.7$$

$$\begin{aligned} S_{i_j} \geq & [(S_{i(j+1)} + P_{i(j+1)}) \cdot L1_{ij} + (S_{ij} + P_{ij}) \cdot L2_{ij} - \lambda \cdot (1 - Y_{ijij})] \cdot B3_{ij} \\ & + [(S_{i(j+1)} + P_{i(j+1)}) \cdot L1_{ij} + (S_{ij} + P_{ij}) \cdot L2_{ij} - \lambda \cdot (1 - Y_{ijij})] \cdot B2_{ij} \\ & + [(S_{i(j+1)} \cdot L1_{ij} + (S_{ij} + P_{ij}) \cdot L2_{ij} - \lambda \cdot (1 - Y_{ijij})] \cdot B1_{ij} \\ & + [(S_{ij} + P_{ij}) - \lambda \cdot (1 - Y_{ijij})] \cdot B0_{ij}, \\ & \forall i, i \in [1, \dots, N], \forall j \in [1, \dots, N_i - 1], \forall j_1 \in [1, \dots, N_i] \end{aligned} \quad 2.8$$

$$S_{ij} \geq [(S_{ij} + P_{ij}) \cdot L2_{ij} - \lambda \cdot Y_{ijij}], \forall i, i_1 \in [1, \dots, N], \forall j \in [1, \dots, N_i], \forall j_1 \in [1, \dots, N_i] \quad 2.9$$

$$S_{i_j} \geq [(S_{ij} + P_{ij}) \cdot L2_{ij} - \lambda \cdot (1 - Y_{ijij})], \forall i, i_1 \in [1, \dots, N], \forall j \in [1, \dots, N_i], \forall j_1 \in [1, \dots, N_i] \quad 2.10$$

$$S_{ij} \geq 0, \forall i \in [1, \dots, N], \forall j \in [1, \dots, N_i] \quad 2.11$$

$$Y_{ijij} \in \{0, 1\}, \forall i, i_1 \in [1, \dots, N], \forall j, j_1 \in [1, \dots, N_i] / M_{ij} = M_{i_j} \quad 2.12$$

L'équation (2.2) définit  $\lambda$  comme une constante d'une grande valeur par rapport aux données du problème. L'équation (2.3) représente la contrainte de précédence pour toutes les opérations d'un même job. L'équation (2.4) définit  $C_{\max}$  comme la date de fin du job le plus long du problème. Les équations (2.5) et (2.6) représentent des contraintes de précédence des opérations  $O_{ij}$  et  $O_{i_1j_1}$  sur une machine, indépendamment de la connaissance de celle qui passe en premier. Mais, sur ces deux équations, on suppose qu'aucune de ces deux opérations n'est ni la dernière, ni l'avant-dernière opération de leurs jobs respectifs. Les contraintes de

précédence (2.5) et (2.6) sont représentées par des équations (2.7) et (2.8) (respectivement (2.9) et (2.10)), lorsqu'une opération est l'avant-dernière (respectivement la dernière) de son job. L'équation (2.11) assure que toutes les opérations commencent à une date positive. L'équation (2.12) définit  $Y_{ijl,jl}$  comme une variable binaire.

**Résultats :** L'exploitation de ce modèle dans le logiciel d'optimisation *Mosel Xpress* nous a permis d'obtenir les résultats optimaux pour des problèmes de tailles différentes, allant de 5 jobs/3 machines jusqu'à 10 jobs/100 machines. Nous avons pu remarquer que les temps de calcul sont très élevés (supérieurs à 20 minutes) au-delà d'une taille de problème de 10 jobs/10 machines, et que la limite de calculabilité augmente très vite avec le nombre de jobs (Tableau 2-1). L'évolution du temps de calcul des méthodes exactes, aussi bien en fonction du nombre de jobs que du nombre de machines, nous oblige à développer des méthodes approchées.

Jobs	Machines							
	5	6	7	10	15	20	50	100
5	0,065	0,15	0,17	0,39	0,64	0,9	2,22	9,15
6	0,14	0,27	0,3	0,94	2,37	7,32	29,84	75,69
7	0,24	0,49	0,57	3,24	29	132	1085	7331
8	0,49	1,07	1,4	19,31	347	2707	35667*	27007*
9	1,07	3,24	4	102	4532	24345*	88249*	> 24 h
10	5,39	13	17	1161	58149*	> 24 h	> 24 h	> 24 h

Tableau 2-1. Temps de calcul moyen (en s ou en h) de la solution optimale pour une contrainte de blocage *RCb* uniforme (\* 10 instances par taille).

### 2.3.4 Méthodes approchées

Pour la résolution des problèmes d'ordonnancement de type jobshop, plusieurs heuristiques ont été développées. Plusieurs heuristiques ont été proposées dès les années 1990 (Hatzikonstantis et Besant, 1992). On peut citer, par exemple, les méthodes donnant la priorité à l'opération imminente la plus courte ou celle présentant le temps d'opération le plus court, qui y sont considérées comme plutôt efficaces. L'heuristique « Bottleneck Procedure » est une des plus connues pour attaquer les problèmes de type jobshop classiques (Adams et al., 1988). Elle a été adaptée à un cas où les contraintes de précédence sont stochastiques (Neumann et Schneider, 1999). Elle a aussi été appliquée à la plupart des cas classiques rencontrés dans l'industrie (Schutten, 1998) et reste aujourd'hui une des plus efficaces.

Du côté des méta-heuristiques, nombreuses sont celles qui ont été utilisées pour résoudre des problèmes de type job-shop, une recherche tabou guidée par une procédure bottleneck (Pezzella et Merelli, 2000) un algorithme de type colonie de fourmis (Huang et Yang, 2008), ou encore un recuit simulé avec des structures de voisinages basées sur des permutations d'opérations (Lange et Werner, 2019).

**Contributions :** Nous avons d'abord proposé une heuristique qui permet de résoudre ces types de problèmes « par construction », en évitant d'abord les conflits qui peuvent advenir avec les différentes contraintes de blocages, puis en choisissant la prochaine opération à placer, en cherchant à minimiser un critère prenant en compte respectivement le makespan partiel, la somme des temps d'inactivité sur les machine et la somme des temps d'exécution des opérations déjà placées (Trabelsi et al., 2010).

Nous avons aussi développé une fonction d'évaluation qui permet de calculer le makespan d'un problème de type jobshop en fonction de la matrice de blocages présentée au paragraphe précédent. Ainsi, nous sommes en mesure d'utiliser non seulement les méta-heuristiques que

nous avons développées au laboratoire, un algorithme génétique, un algorithme de recuit simulé, ainsi qu'un algorithme de type electromagnetism-like (EML), mais aussi n'importe quelle autre (Sauvey et al., 2015a).

Pour développer cette fonction d'évaluation, nous avons fait appel à la technique développée par Bierwirth en 1995. Il a proposé d'utiliser un vecteur contenant  $N*M$  éléments (où  $N$  est le nombre de jobs et  $M$  est le nombre de machines) dont les valeurs successives correspondent au numéro du job. Dans son utilisation initiale, Bierwirth faisait correspondre ce vecteur à un ordonnancement en posant sur le diagramme de Gantt les opérations dans l'ordre donné par le vecteur. Mais, dans le cas où les conditions de blocage entre les opérations sont variables, nous opérons un groupement d'opérations en fonction de la matrice de blocage passée en paramètre d'entrée, afin d'obtenir le diagramme de Gantt d'un ordonnancement qui satisfait ces contraintes, comme présenté sur la figure 2-2. Lorsque l'opération d'un job est suivie d'une contrainte de blocage de type  $RSb$  ou  $RCb^*$ , la machine sur laquelle elle est traitée doit attendre que l'opération suivante soit placée afin de déterminer la date à partir de laquelle la machine est à nouveau disponible. Dans le cas d'une contrainte de blocage de type  $RCb$ , il faut placer les deux opérations suivantes afin de connaître cette date de disponibilité. On agrège ainsi les opérations les unes aux autres par paquets de 1 ou 2, de façon cumulative, en fonction des contraintes de blocage rencontrées, de la même façon que celle qui a été présentée sur la figure 1-8, pour le cas du flowshop hybride. Le groupe d'opérations se termine dès que la dernière opération de l'agrégation en cours est suivie de la contrainte  $Wb$ . Ainsi, à chaque vecteur de Bierwirth, on peut faire correspondre un ordonnancement, en plaçant les groupes d'opérations sur le diagramme de Gantt, les uns après les autres, comme le montre la figure 2-2.

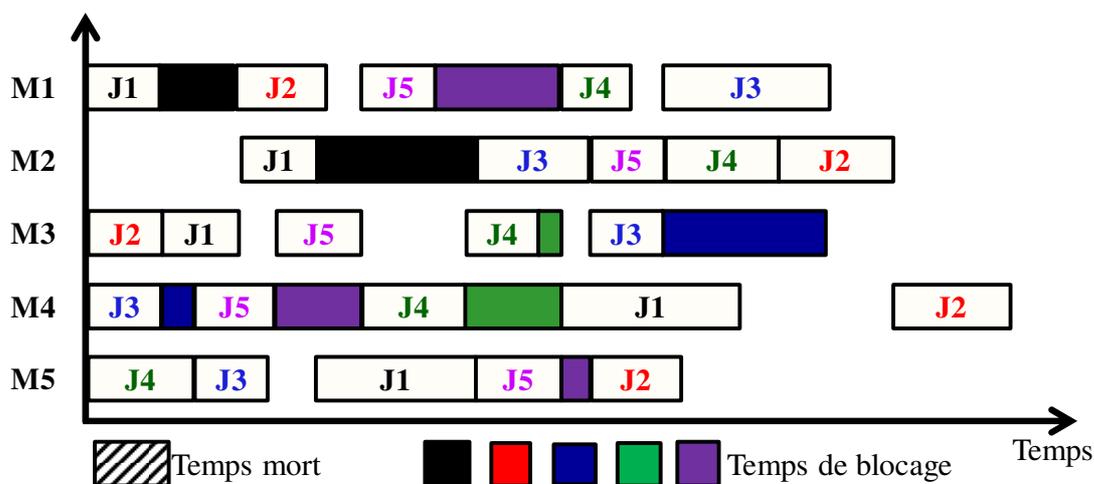
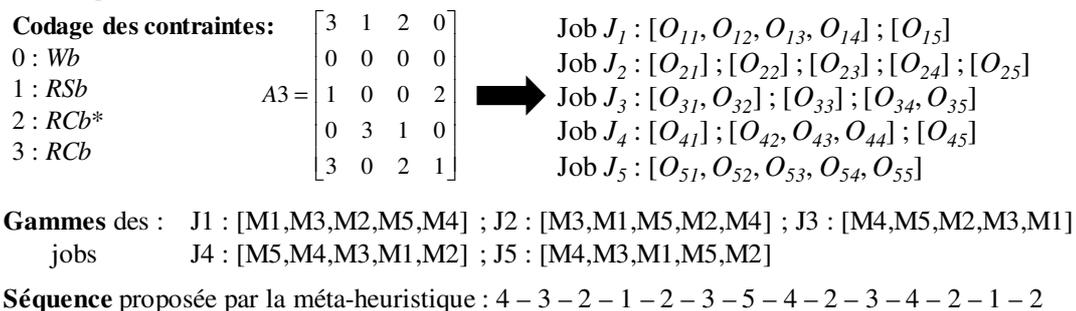


Figure 2-2. Groupement des opérations dans la fonction d'évaluation.

**Résultats :** Nous avons utilisé cette fonction d'évaluation avec trois méta-heuristiques, un algorithme EML, un recuit simulé et un algorithme génétique. Nous l'avons testée sur des

benchmarks de tailles différentes ( $3j3m$ ,  $3j4m$ ,  $5j3m$  et  $5j5m$ ) que nous avons publiés, ainsi que sur les benchmarks de Lawrence (Sauvey et *al.*, 2015a).

Nous avons d'abord considéré les 4 contraintes de blocages posées de façon uniforme sur les problèmes. Puis, nous avons testé 4 matrices de blocages mixtes pour évaluer à la fois notre modèle mathématique et la fonction d'évaluation.

Les résultats que nous avons obtenus sur les contraintes de blocage uniformes sont présentés dans le Tableau 2-2. Pour ces problèmes, même si on peut se satisfaire de la performance globale obtenue pour une première approche, on aussi déplore que le taux d'erreur soit très mauvais pour des tailles de problèmes modestes. Ces mauvaises performances apparaissent particulièrement avec les blocages  $RSb$  et  $RCb^*$ .

		<b><i>Wb</i></b>	<b><i>RSb</i></b>	<b><i>RCb*</i></b>	<b><i>RCb</i></b>
<b><i>j3m3</i></b>	Sopt = Cmax	20	11	17	20
	Erreur Globale	0,0%	11,4%	1,8%	0,0%
<b><i>j3m4</i></b>	Sopt = Cmax	20	13	15	17
	Erreur Globale	0,0%	17,9%	6,1%	1,8%
<b><i>j5m3</i></b>	Sopt = Cmax	19	3	12	19
	Erreur Globale	1,5%	24,2%	5,5%	0,3%
<b><i>j5m5</i></b>	Sopt = Cmax	20	1	3	6
	Erreur Globale	0,0%	45,8%	16,1%	8,8%

Tableau 2-2. Résultats de l'algorithme génétique sur les job-shop avec contraintes de blocage uniformes.

Notre explication est que les contraintes de blocages  $RSb$  et  $RCb^*$  bloquent seulement la machine en cours en fonction, respectivement, de la date de début ou de fin de l'opération sur la machine suivante. Cette contrainte est prise en compte de façon optimale dans le modèle mathématique alors que notre fonction d'évaluation nous contraint à lier toutes les opérations d'un job les unes aux autres, ce qui est, évidemment, loin d'être optimal.

Cet inconvénient est moins présent pour une contrainte de type  $RCb$ , parce qu'elle contraint beaucoup plus fortement les machines et les opérations. C'est un point sur lequel nous travaillons pour améliorer les performances de notre fonction d'évaluation.

Par ailleurs, les très bons résultats obtenus sans blocage ( $Wb$ ) valident toute la méthode que nous avons proposée, du vecteur de Bierwirth jusqu'à son utilisation dans la fonction d'évaluation ainsi que la pertinence de l'utilisation de l'algorithme génétique pour résoudre des problèmes allant jusqu'à 25 gènes. En effet, quand aucune difficulté supplémentaire n'est imposée, on trouve les solutions optimales avec notre méthode dont, de plus, le temps d'exécution est rapide, environ 2 secondes pour des problèmes de taille  $j5m5$ .

Notre méthode fonctionne et garantit une solution viable, c'est-à-dire sans situation de conflit, grâce à la façon dont nous avons conçu notre fonction d'évaluation, quelle que soit la taille du problème et quelle que soit la matrice de blocages (Sauvey et *al.*, 2020).

## 2.4 Jobshop Hybride

Dans un problème de type jobshop hybride, il existe au moins une opération pour laquelle on dispose de plus d'une machine pour la traiter. Comme pour le jobshop classique, nous avons développé un modèle mathématique permettant de prendre en compte des contraintes de blocage variables d'une opération à l'autre dans le même problème, ainsi que trois bornes inférieures (Gorine et *al.*, 2012). Malheureusement, ce modèle trouve ses limites assez vite dans la mesure où les problèmes de type job-shop hybride sont NP-difficiles. Nous avons donc développé une heuristique permettant de résoudre le problème avec des conditions de blocage variables d'une opération à l'autre. Nous avons également développé une fonction d'évaluation performante qui, associée aux méta-heuristiques classiques, permet de résoudre ces problèmes avec précision en des temps raisonnables (Sauvey et Trabelsi, 2015b).

### 2.4.1 Complexité

Dans la mesure où les problèmes avec 3 jobs sont NP-difficiles dans tous les cas de jobshop classiques et pour tous les critères d'optimisation classiques (Sotskov et Shakhlevich, 1995), la démonstration d'une complexité NP-difficile pour les job-shop hybrides à 3 jobs est acquise. Seuls restent à étudier les problèmes à deux jobs.

Une étude sur le problème avec 2 jobs avec des machines différentes sur chaque étage, c'est à dire avec des temps d'opérations différents selon que l'on choisisse une machine ou une autre sur un étage donné, a été présentée dans (Mati et Xie, 2004). Il est démontré que ce problème est NP-difficile, aussi bien lorsque l'on choisit le makespan que le temps total de réalisation d'un job comme fonction objectif. La NP-difficulté est conservée lorsque la préemption est autorisée.

### 2.4.2 Bornes inférieures

Trouver une borne inférieure de qualité pour les problèmes de type jobshop hybride est assez compliqué. De plus, rares sont les références qui existent sur ce sujet. On peut néanmoins citer les travaux de Prot et Bellenguez-Morineau (2012) au sujet d'un problème de production d'objets métalliques. Nous présentons ici les bornes inférieures que nous avons proposées. Récemment, un algorithme d'optimisation par essaim de particules a été amélioré par la prise en considération de bornes inférieures pour le problème de type jobshop hybride afin de réduire l'espace de recherche de solutions (Zarrouk et *al.*, 2019).

**Contributions :** Nous avons proposé trois bornes inférieures pour les problèmes de type jobshop hybride, avec la contrainte de blocage de type *RCb* (Gorine et *al.*, 2012).

La première borne inférieure ( $Binf_1$ ) est la borne classique, qui s'appuie sur le temps total d'exécution de chaque job. La deuxième ( $Binf_2$ ) est basée sur la répartition des opérations sur les machines d'un étage, en utilisant la partie entière, plus les têtes et les queues. La troisième borne inférieure ( $Binf_3$ ) est une amélioration de celle donnée par Boumediène-Merouane et Derbala (2006) pour les machines parallèles, basée sur une répartition uniforme des temps d'opérations sur un étage. Des descriptions précises de ces bornes inférieures sont données dans Gorine (2011).

**Résultats :** Les résultats obtenus avec ces bornes inférieures ont été présentés dans (Gorine et *al.*, 2012). L'analyse que l'on peut en tirer s'appuie sur les deux points suivants. D'abord, lorsque le nombre de machines est identique sur tous les étages, la borne  $Binf_1$  donne de

bonnes performances, globalement inférieures à 5% d'erreur par rapport aux solutions optimales, et souvent nulle. On observe également que les performances de  $Binf_2$  et  $Binf_3$  sont voisines, et qu'elles s'améliorent lorsque ce nombre identique de machines par étage augment. Ensuite, on constate que lorsque le nombre de machines par étage est différent d'un étage à un autre, les performances s'inversent.  $Binf_2$  et  $Binf_3$  deviennent meilleures que de  $Binf_1$ , ce qui justifie le développement de chacune de celles-ci.

### 2.4.3 Méthodes exactes

Pour les problèmes de type jobshop hybride, plusieurs auteurs ont proposé des méthodes exactes. Jurisch (1992) a proposé une méthode de séparation et évaluation, et Gomes et al. (2005) ont donné un modèle de programmation linéaire en nombres entiers avec le critère de minimisation du temps d'exécution total (makespan). Plus récemment, une modélisation mathématique du problème cyclique a été proposée (Quinton et al., 2020).

**Contributions :** Nous avons proposé un modèle mathématique qui permet de donner des solutions exactes pour ces problèmes, avec la prise en compte de matrices de blocage mixtes quelconques. Les équations que contiennent ce modèle sont proches de celles qui composent celui du jobshop classique, avec les adaptations nécessaires au cas hybride, c'est-à-dire la prise en compte possible de plusieurs machines identiques en parallèle sur chaque étage. Ce modèle a été publié à la conférence ETFA'2015 (Sauvey et Trabelsi, 2015b).

**Résultats :** Le modèle mathématique que nous avons développé a été testé sur des instances allant jusqu'à 10 jobs/10 étages. Il donne des résultats avec des temps de calcul raisonnables pour des contraintes de blocage  $Wb$  et  $RSb$ , mais demande des temps de calcul plus importants pour les contraintes  $RCb^*$  et  $RCb$  (Sauvey et Trabelsi, 2015b).

### 2.4.4 Méthodes approchées

Pour les problèmes de type jobshop hybride, plusieurs méthodes approchées ont été proposées, souvent en rapport avec les problèmes particuliers auxquels se sont intéressés leurs auteurs. On peut citer, entre autres, (Dauzère-Pérès et Paulli, 1997), (Jansen et al., 2000), (Kacem et al., 2002), (Gao et al., 2008), (Ben Hmida et al., 2010) ou encore (Yazdani et al., 2010).

**Contributions :** Nous avons développé une fonction d'évaluation qui permet de calculer le makespan d'un problème de type jobshop hybride en fonction de la matrice de blocages, d'une façon similaire à ce que nous avons présenté pour le jobshop classique (Sauvey et Trabelsi, 2015b).

**Résultats :** Nous avons testé cette fonction d'évaluation avec un algorithme génétique sur deux types de problèmes, avec des matrices de blocages homogènes et inhomogènes. La première conclusion sur les résultats obtenus est la validation de notre méthode. En effet, lorsqu'on l'a utilisée sur les problèmes homogènes sans blocage ( $Wb$ ), il nous est arrivé de trouver à plusieurs reprises la solution optimale, sur des problèmes à 7 jobs et 10 étages. La seconde conclusion est que les groupes d'opérations successives formés en rapport avec la matrice de blocage nous permet de trouver des bonnes solutions avec des matrices de blocages inhomogènes, inférieurs à 2% d'erreur. Même si nous en avons expliqué la cause, une voie d'amélioration réside néanmoins dans la résolution des problèmes homogènes avec contraintes de blocage de type  $RCb$  et  $RCb^*$ , pour lesquels les pourcentages d'erreur sont insatisfaisants pour des problèmes de tailles modestes, autour de 15% pour des problèmes à 7 jobs et 10 étages (Sauvey et Trabelsi, 2015b).

## 2.5 Conclusion et contribution scientifique

Nous avons présenté dans ce chapitre nos contributions à la résolution des problèmes d'ordonnement de type jobshop, classique et hybride, soumis à des contraintes de blocage mixtes, pour la prise en compte desquelles nous avons introduit la définition d'une matrice de blocages.

Les réponses que nous avons apportées pour répondre aux verrous scientifiques auxquels nous nous sommes attaqués, sont :

- La proposition de bornes inférieures qui s'adaptent aux problèmes mixtes étudiés.
- La création d'un modèle mathématique générique qui permet la résolution exacte des problèmes classique et hybride avec des logiciels de programmation linéaire en nombres entiers.
- La création de nouvelles heuristiques pour la résolution du problème sous un angle différent.
- La création de deux fonctions d'évaluation, une par type de problème, qui garantissent une solution viable, c'est-à-dire sans situation de blocage, pour des problèmes de tailles quelconques, lorsqu'on les intègre à la méta-heuristique de notre choix.

En conclusion, à la lumière des travaux qui ont été menés sur ce nouveau terrain, on peut d'ores et déjà assurer que les méthodes approchées seront celles qu'il faudra continuer d'utiliser et de développer afin de trouver des solutions non seulement viables, mais aussi efficaces (précises et rapides) aux problèmes d'ordonnement de type jobshop avec contraintes de blocage mixtes.



# Chapitre 3 : Problèmes variés de modélisation et d'optimisation des systèmes de production et de logistique

## 3.1 Introduction et verrous scientifiques

Les mots modélisation et optimisation sont employés par tous les scientifiques, car ils sont la raison d'être de l'activité scientifique. En revanche, les mots qui sont presque toujours oubliés sont ceux qui suivent : « quoi ? », et « dans quel but ? ». En effet, la modélisation et l'optimisation ne sont que des concepts. Chacune n'a d'intérêt que si elle est appliquée à « quelque chose ». Les modèles mathématiques et les méthodes d'optimisation que nous développons peuvent s'appliquer à de nombreux domaines. Nous présentons dans ce chapitre plusieurs applications sur lesquelles nos outils ont démontré leur pertinence.

Quand on modélise, on modélise quelque chose : un système, un processus, un capteur, une organisation, une entreprise, ... Modéliser est une chose qui n'est ni facile, ni répétitive. Derrière ce mot, plusieurs façons de faire existent. Il existe plusieurs types de modèles, (analytiques, numériques, ...), plusieurs objectifs de modélisation (pour l'enseignement, pour faire des prévisions, pour faire une analyse de sensibilité, pour en tirer une optimisation).

Nos modèles ont pu démontrer leur efficacité dans plusieurs domaines. Nous avons travaillé en collaboration avec l'Hôpital Robert Pax de Sarreguemines, afin d'aider les responsables du bloc à atteindre les objectifs de rentabilité qui leurs sont fixés par les autorités nationales. Nous travaillons aussi sur des problèmes de ré-ordonnancement. En effet, les deux premiers chapitres de ce mémoire traitent de problèmes *offline*, c'est-à-dire pour lesquels nous disposons de la totalité des données du problème au moment où on lance les méthodes de résolution. Dans un problème de ré-ordonnancement, on prend connaissance de nouvelles données du problème au fur et à mesure que l'on avance dans le temps, ce qui suppose une résolution *online*. Par ailleurs, j'ai également développé un modèle mathématique qui permet de prévoir la date de retour sur investissement du financement de nouvelles immobilisations industrielles.

De même, l'optimisation de peut se faire qu'avec un ou plusieurs « objectifs », ainsi qu'avec une représentation (le modèle) de la chose à optimiser. Devant l'immensité du champ des possibles, ce que nous présentons dans ce chapitre en termes d'optimisation, est l'acquisition, au fur et à mesure des opportunités que j'ai saisies, d'une expérience dans ce domaine.

Je développe aussi des méthodes d'optimisation, efficaces, que je confronte à plusieurs domaines d'application. Je les ai appliquées, bien sûr, aux problèmes d'ordonnancement décrits dans les chapitres précédents, ainsi qu'aux applications auxquelles je me suis intéressé. Cependant, j'ai également quitté ma zone de confort pour aller confronter mes méthodes, ainsi que ma façon de les construire, à d'autres problèmes. Deux exemples de « sorties de zone » auxquelles j'ai contribué sont aussi présentés. D'abord, j'ai utilisé mes méthodes d'optimisation sur des modèles de fabrication/reconditionnement pour l'amélioration de l'utilisation des produits manufacturés dans un objectif de développement durable. Ces modèles posent la double problématique de l'optimisation sur des fonctions d'évaluation qui ont des temps de calculs non négligeables, ainsi que sur des modèles basés sur des simulations stochastiques. Je présente ensuite des problèmes de localisation d'installations industrielles, avec discrétisation du temps, détermination du plan de production, et différenciation des clients en fonction du service qui leur est fourni. En collaboration avec le Professeur Melo de

l'HTW Saar (Sarrebbruck, Allemagne) et le Dr. Correia de l'Universidade Nova de Lisboa (Lisbonne, Portugal), j'ai proposé des heuristiques et des améliorations locales, afin de trouver des solutions viables à ces problèmes.

Le verrou scientifique commun aux deux concepts dont il est question dans ce chapitre est celui de « **la compréhension du besoin** ». La conséquence directe est que, si l'on souhaite s'attaquer à ce verrou, il faut faire preuve d'adaptabilité, ou d'agilité, aussi bien dans l'activité de conception de modèles que de méthodes d'optimisation. En effet, modélisation et optimisation sont des termes que tous les scientifiques utilisent et pratiquent au quotidien, mais qui sont bien souvent dépendants des domaines de travail ou des spécialités.

Ainsi, un électrotechnicien qui travaille sur la modélisation électromagnétique par éléments finis peut être résistant à l'idée qu'un autre puisse aussi modéliser un moteur avec des simples équations analytiques. Dans cet exemple, on voit deux modélisateurs qui travaillent sur des modèles différents, l'un analytique et l'autre numérique, mais les modèles répondent surtout à deux besoins différents. Parce qu'écrire un modèle ne se résume pas qu'à l'écriture et la juxtaposition d'équations, la compréhension du besoin de modélisation est un verrou scientifique à l'attaque duquel l'expérience accumulée au cours des vingt dernières années permet de répondre.

De même, au travers des exemples présentés dans ce chapitre, nous pouvons constater qu'il en est de même au sujet de l'optimisation. En effet, les espaces de solutions présentent des reliefs propres aux applications dont ils sont les images respectives. Pour satisfaire l'utilisateur final, le concepteur de la méthode d'optimisation doit, là encore, comprendre le besoin ainsi que le modèle, et s'y adapter. Lors de mes « sorties de zones de confort », j'ai constaté que mes méthodes d'optimisation sont efficaces, y compris sur des modèles dont je n'étais pas auteur. Ainsi, même si ce n'est pas une preuve de leur robustesse, il me semble que cela témoigne de la qualité de leur programmation. J'ai également prouvé ma capacité à proposer des solutions rapides et efficaces, quel que soit le problème qui m'est posé, ainsi que mon aptitude à travailler en collaboration avec des chercheurs internationaux. Tous ces travaux ont fait l'objet de publications.

### **3.2 Applications hospitalières**

Pendant les années au cours desquelles les contraintes de coûts se sont faites de plus en plus fortes sur la gestion des établissements de santé, beaucoup ont développé des partenariats avec des laboratoires de recherche afin d'optimiser l'utilisation de leurs ressources, notamment celles qui représentent un centre de coût élevé. C'est dans ce contexte que mes activités de recherche au LGIPM se sont orientées vers l'optimisation des ressources du bloc opératoire, dans le cadre d'une collaboration avec la communauté d'agglomération Sarreguemines Confluences et l'Hôpital Robert Pax de Sarreguemines.

J'ai co-encadré le doctorat d' Afef Bouguerra au sujet de l'application des méthodes d'ordonnancement d'outils de production flexibles aux systèmes hospitaliers (Bouguerra, 2017). L'objectif est l'atteinte d'un meilleur niveau de service et de gestion des ressources, sous les contraintes croisées d'un manque de moyens et d'une exigence toujours croissante des patients quant à la qualité des soins. La thèse s'est orientée vers la gestion et l'optimisation du bloc opératoire, car c'est un secteur stratégique de l'hôpital et un centre de coût et de profit potentiel important. Les éléments qui ont été pris en compte dans ce travail sont : la disponibilité des salles, des chirurgiens, le respect des réglementations, notamment en matière de nombre d'heures de travail des équipes médicales ou de temps de nettoyage des salles opératoires. Les objectifs visés lors de ces travaux ont été le taux de remplissage des

salles opératoires ouvertes, ainsi que la meilleure utilisation des moyens financiers et humains de l'hôpital pour réaliser les opérations.

Dans un bloc opératoire, deux types d'opérations sont effectuées, celles qui ont fait l'objet d'une préparation et les urgences. Celles-ci, par définition, n'ont pas pu être préparées et s'imposent aux chirurgiens ainsi qu'à l'ordonnancement, à un moment inconnu et impossible à prévoir à l'avance. La première catégorie d'opérations est qualifiée d'élective et l'autre de non-élective.

Un modèle mathématique a été développé afin de trouver une solution optimale aux problèmes d'ordonnancement posés dans le bloc opératoire en prenant en compte toutes les contraintes citées précédemment. Ce modèle permet d'optimiser la répartition des opérations dans un bloc opératoire comptant 4 salles, 12 chirurgiens pour la réalisation de 90 opérations portant sur 6 spécialités, sur une période de 5 jours (Bouguerra et *al.*, 2015). Cette taille de problème est typiquement celle qui se rencontre chaque semaine dans des centres hospitaliers de taille moyenne, comme celui de Sarreguemines. En outre, nous avons utilisé les méthodes de résolution des problèmes de type flowshop hybride avec contraintes de blocages afin de définir les emplois du temps des autres ressources à partir du planning opératoire. De plus, un outil d'aide à la décision pour l'intégration des opérations urgentes au programme opératoire a été développé afin de pouvoir à la fois mieux prendre en charge les patients et perturber le moins possible le programme opératoire préexistant (Bouguerra et *al.*, 2016).

### 3.2.1 Modèle mathématique du programme opératoire

L'étude bibliographique qui a été réalisée sur le sujet nous a permis d'identifier, d'une part, les similitudes existantes entre les systèmes hospitaliers et les systèmes de production et, d'autre part, les méthodes utilisées pour la résolution des problèmes.

Dans un premier temps, on peut identifier les salles d'opérations ou encore les lits de réveil aux machines regroupées en centres de production et les équipes médicales aux équipes techniques (Fei, 2006). Parmi les travaux de référence que nous avons identifiés au sujet de ces similitudes, ceux de Chaabane et *al.* (2003) nous ont particulièrement inspirés. Les hôpitaux y sont décrits, à l'image des entreprises, comme des structures soumises à des contraintes simultanées de coûts, qualité et délais. Des rapprochements entre les organisations observées dans les hôpitaux ont même été effectués avec les principaux problèmes classiques d'ordonnancement. En particulier, l'ordonnancement dans un bloc opératoire est comparé à un flowshop hybride à deux étages (Chaabane, 2004).

On retrouve également dans le milieu hospitalier les trois niveaux de décision, stratégique, tactique et opérationnel.

Au sujet du programme opératoire, il s'agit de construire l'emploi du temps des différentes salles d'opérations, pour une période donnée, en général pour une semaine. Ce travail est très difficile et on constate une grande variabilité des approches sur le terrain, en fonction des statuts des établissements, ainsi que des objectifs qui leur sont imposés. De plus, au niveau théorique, deux grandes approches existent, l'une par allocation préalable de plages, appelée *block scheduling* et l'autre, *open scheduling*, avec laquelle on peut allouer une opération à chaque salle opératoire a priori. Une troisième approche, mêlant les deux principales, procède par allocation préalable de plages puis par un ajustement final grâce à la méthode ouverte, *modified block scheduling* (Patterson, 1996), (Kharraja, 2003).

**Contributions :** L'optimisation du fonctionnement d'un bloc opératoire est un problème complexe et difficile. Les travaux sur lesquels nous avons concentré nos efforts sont la planification et l'ordonnancement des opérations chirurgicales, au niveau de décision

opérationnel. Le modèle linéaire en nombres entiers qui a été développé permet d'obtenir comme résultat un programme opératoire conforme à la stratégie de type « *open scheduling* ». La fonction objectif de ce modèle mathématique est la maximisation du taux d'occupation des salles ouvertes du bloc opératoire, qui est une contrainte majeure imposée aux hôpitaux aujourd'hui.

Dans le modèle que nous avons développé, le temps est discrétisé et plusieurs paramètres sont réglables, comme l'horizon de planification, le nombre et la spécialité des opérations à effectuer, le nombre de chirurgiens et la spécialité de chacun, ainsi que les plages horaires au cours desquelles ils sont disponibles pour opérer. Chaque opération « connaît » le chirurgien qui doit la réaliser, car c'est en général le cas pour les opérations électives (qui sont prévues et ont, en général, fait l'objet d'une consultation préparatoire avec le chirurgien). Les heures supplémentaires ne sont pas autorisées, donc pas modélisées.

Les contraintes prises en compte sont les plages de disponibilité des chirurgiens, l'obligation d'affecter une spécialité par salle et par jour, et les contraintes d'occupation des chirurgiens car un chirurgien ne peut pas réaliser deux opérations en même temps.

Le modèle fournit les résultats suivants : les salles opératoires ouvertes, l'ordre de passage des opérations ainsi que leur affectation aux salles opératoires, sur l'horizon de planification.

Les paramètres du modèle mathématique que nous avons développé sont les suivants :

- $no$  : Nombre de chirurgies électives à planifier
- $nc$  : Nombre de chirurgiens
- $ns$  : Nombre de salles
- $nj$  : Nombre de jours
- $nsp$  : Nombre de spécialités
- $npj$  : Nombre de périodes
- $O = \{1 \dots no\}$  : Ensemble des opérations
- $C = \{1 \dots nc\}$  : Ensemble des chirurgiens
- $S = \{1 \dots ns\}$  : Ensemble des salles
- $SP = \{1 \dots nsp\}$  : Ensemble des spécialités
- $J = \{1 \dots nj\}$  : Ensemble des jours
- $T = \{1 \dots npj\}$  : Ensemble des périodes

Les données sont les suivantes :

- $D_o$  : Durée de l'opération  $o$
- $OC_o$  : Chirurgien affecté à l'opération  $o$
- $OSP_o$  : Spécialité correspondante à l'opération  $o$
- $AS_{cjt}$  : donne les disponibilités du chirurgien  $c$ , le jour  $j$  à la période  $t$ . Cette variable vaut 1 si le chirurgien  $c$  est disponible le jour  $j$  à la période  $t$ , 0 sinon.

Les variables de décision du modèle permettent d'obtenir, d'une part la date de début de chaque opération, en précisant le jour et la salle d'opération, et d'autre part la spécialité assignée à chaque salle d'opération chaque jour. Ainsi, nous avons :

- $x_{o,j,s,t}$  : vaut 1 si l'opération  $o$  débute le jour  $j$ , dans la salle  $s$ , à la période  $t$ , 0 sinon.
- $Y_{sp,j,s}$  : vaut 1 si la spécialité  $sp$  est assignée à la salle  $s$  le jour  $j$ , 0 sinon.

Les équations du modèle sont les suivantes :

$$\text{Maximize} \left[ \left( \alpha \sum_{o \in O} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} (x_{ojst} D_o) \right) - \left( \beta \sum_{o \in O} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} ((nj - j + 1)(npj - t + 1) x_{ojst}) \right) \right] \quad 3.1$$

Soumis aux contraintes suivantes :

$$x_{ojst} D_o \leq \sum_{t'=t}^{\text{Min}(t+D_o-1, npj)} AS_{OC_o jt'}, \forall o \in O, \forall j \in J, \forall s \in S, \forall t \in T \quad 3.2$$

$$\sum_{\substack{o' \in O \\ OC_o = OC_{o'} \\ o \neq o'}} \sum_{\substack{s' \in S \\ s \neq s'}} \sum_{t'=t}^{\text{Min}(t+D_o-1, npj)} X_{o' j s' t'} \leq D_o (1 - x_{ojst}), \forall o \in O, \forall j \in J, \forall s \in S, \forall t \in T \quad 3.3$$

$$\sum_{sp \in SP} y_{spjt} \leq 1, \forall j \in J, \forall t \in T \quad 3.4$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} x_{ojst} \leq 1, \forall o \in O \quad 3.5$$

$$\sum_{o \in O} x_{ojst} \leq 1, \forall s \in S, \forall t \in T \quad 3.6$$

$$\sum_{\substack{o' \in O \\ o' \neq o}} \sum_{t'=1}^{D_o-1} x_{o' j s (t+t')} \leq D_o (1 - x_{ojst}), \forall o \in O, \forall j \in J, \forall s \in S, \forall t \in T | t \leq (npj - D_o + 1) \quad 3.7$$

$$\sum_{o \in O} x_{ojst} \leq y_{OSP_o jt}, \forall j \in J, s \in S, t \in T \quad 3.8$$

$$x_{ojst} \in \{0,1\}, \forall o \in O, \forall j \in J, \forall s \in S, \forall t \in T \quad 3.9$$

$$y_{spjs} \in \{0,1\}, \forall sp \in SP, \forall j \in J, \forall s \in S \quad 3.10$$

La fonction objectif (3.1) maximise le taux d'utilisation de chaque salle d'opération et minimise le temps d'inactivité entre les chirurgies. Ses deux parties sont pondérées, afin de pouvoir moduler l'importance relative de la première partie par rapport à la seconde. La contrainte (3.2) garantit que chaque chirurgien travaille dans les créneaux pendant lesquels il est disponible. La contrainte (3.3) évite le chevauchement des plages de disponibilité des chirurgiens dans une même salle. La contrainte (3.4) garantit qu'une seule spécialité peut être attribuée à chaque salle, chaque jour. La contrainte (3.5) précise que chaque chirurgie est assignée au plus une seule fois. La contrainte (3.6) garantit que chaque période ne peut accepter qu'une seule intervention. La contrainte (3.7) empêche le chevauchement entre les chirurgies. La contrainte (3.8) représente le lien entre les variables de décision. Enfin, les contraintes (3.9) et (3.10) assurent que les variables sont binaires.

**Résultats :** Ce modèle a été testé avec les données de l'hôpital Robert Pax, ainsi qu'avec d'autres, construites sur la base de ces données réelles, afin d'en tester les limites. Comme on peut s'y attendre, les temps d'exécution du modèle sur le logiciel de modélisation linéaire en nombres entiers Mosel-Xpress augmentent exponentiellement en fonction du nombre de jours considérés. En fonction du nombre d'opérations à traiter, il arrive que le temps de résolution dépasse les limites de l'acceptable. Par exemple, pour un bloc opératoire de 4 salles, avec 12 chirurgiens pour la réalisation de 60 opérations portant sur 6 spécialités, sur une période de 3 jours, le logiciel ne donne un résultat qu'après 45 minutes.

Afin de pouvoir proposer un outil d'aide à la décision à notre partenaire, nous avons développé une heuristique qui reprend le modèle mathématique linéaire, mais réalise l'optimisation jour après jour, au lieu de considérer d'un même coup l'ensemble des jours de planification. A l'utilisation, cette dégradation du modèle s'avère pertinente et efficace. En effet, elle est pertinente car elle garantit une solution à la problématique posée par notre partenaire. Elle est aussi efficace, car elle permet non seulement de trouver des résultats proches de la valeur optimale, mais aussi avec des temps de calcul n'excédant pas la minute (Bouguerra *et al.*, 2015).

### **3.2.2 Flowshop hybride pour l'ordonnancement du processus opératoire**

Le bloc opératoire est le point névralgique de l'hôpital, et c'est aussi celui dans lequel les dépenses en matériel et personnel sont les plus importantes. En conséquence, dans le but d'en utiliser les ressources le plus efficacement possible, il est nécessaire d'occuper les salles, le personnel et le matériel pendant le temps le plus grand possible. Ainsi, lorsque le bloc opératoire ouvre ses portes, les patients doivent être prêts à opérer.

Nous avons analysé le parcours d'un patient avant, pendant et après son opération au bloc. Nous avons observé 4 étapes : le transfert du patient de sa chambre vers le bloc grâce à deux brancardiers, la préparation et l'anesthésie dans une salle d'induction, l'opération en tant que telle, puis la surveillance du réveil. En regardant l'enchaînement de ces étapes pour plusieurs patients, nous avons trouvé une analogie entre ce parcours des patients et un flowshop hybride à 4 étages avec des conditions de blocage du type *RSb* entre chaque étage du problème.

Pour résoudre ce problème, nous avons adapté l'algorithme génétique en fonction des contraintes propres au problème que nous cherchons à résoudre. D'abord, lors de la résolution normale d'un problème hybride, le programme choisit la machine sur laquelle sera traitée chaque tâche. Or, pour le troisième étage, les salles opératoires sont déjà attribuées aux patients ainsi qu'aux spécialités des chirurgiens. Donc, dans cet étage et seulement dans celui-ci, on ajoute cette contrainte. Ensuite, les contraintes de blocage induisent généralement des temps d'attente sur les machines pour les jobs. Ici, le temps de blocage passé à attendre une place en salle de réveil est en fait du temps déjà passé à se réveiller, et sera donc déduit du temps passé au quatrième étage. Par ailleurs, dans un contexte industriel, on a l'habitude de considérer que toutes les ressources sont disponibles en début d'horizon. Dans le cas présent, on impose la date de début du troisième étage soient supérieures à la date d'ouverture du bloc. Les dates de début et de fin de tâche sur les autres étages s'adaptent donc à cette contrainte supplémentaire. Enfin, comme le but de l'utilisation de notre méthode est de fluidifier le trafic, nous avons pondéré la fonction objectif classique avec une partie qui prend en compte la différence des dates d'exécution des opérations entre l'algorithme et le planning prévisionnel.

Les résultats obtenus grâce à ce travail permettent, bien sûr, non seulement la définition des plannings en amont des salles d'opération, mais aussi le dimensionnement des ressources, en termes de brancardiers et de salles d'induction, garantissant le programme prévisionnel. Ainsi, pour garantir un ordonnancement sans perturbation au niveau des salles d'opérations, on doit prévoir un nombre de paires de brancardiers et de lits d'induction égal au nombre de salles opératoires. Par ailleurs, nos résultats numériques ont confirmé les recommandations de la SFAR (Société Française d'Anesthésie et de Réanimation) au sujet des lits en salle de réveil.

### 3.2.3 Aide à la décision pour l'intégration des opérations urgentes

Après avoir traité le problème d'optimisation du taux de remplissage des salles d'opérations pour un programme opératoire donné sur une semaine, nous avons décidé de nous attaquer au problème de l'intégration des opérations urgentes à ce programme opératoire existant, avec l'objectif de le perturber le moins possible, dans la mesure où il était déjà quasi-optimal sans perturbation.

Les urgences ne sont pas les seules sources de perturbation d'un programme opératoire. Certains retards, dus à des imprévus lors d'opérations électives, peuvent arriver, de même que certaines annulations, plus rares. Une étude a démontré que les opérations urgentes représentent environ 70% des causes de la modification d'un programme opératoire existant (Rossi-Türck, 2002). Très souvent, les modifications génèrent des heures supplémentaires et des surcoûts en tous genres, contre lesquels se bat la direction de l'hôpital, responsable de la bonne gestion des moyens. Or, malgré l'enjeu, pourtant considérable en termes de gains de productivité pour le bloc, peu nombreux sont les travaux qui ont abordé ce problème.

On peut réserver, a priori, lors de l'élaboration du planning, une période pour l'intégration des opérations urgentes. Le problème de cette approche est que la salle réservée risque de ne pas convenir à la nature de l'urgence à opérer (Wullink et *al.*, 2007). En fonction de la probabilité d'occurrence d'opérations urgentes, on peut insérer dans le programme opératoire plusieurs périodes réservées (Gerchak et *al.*, 1996).

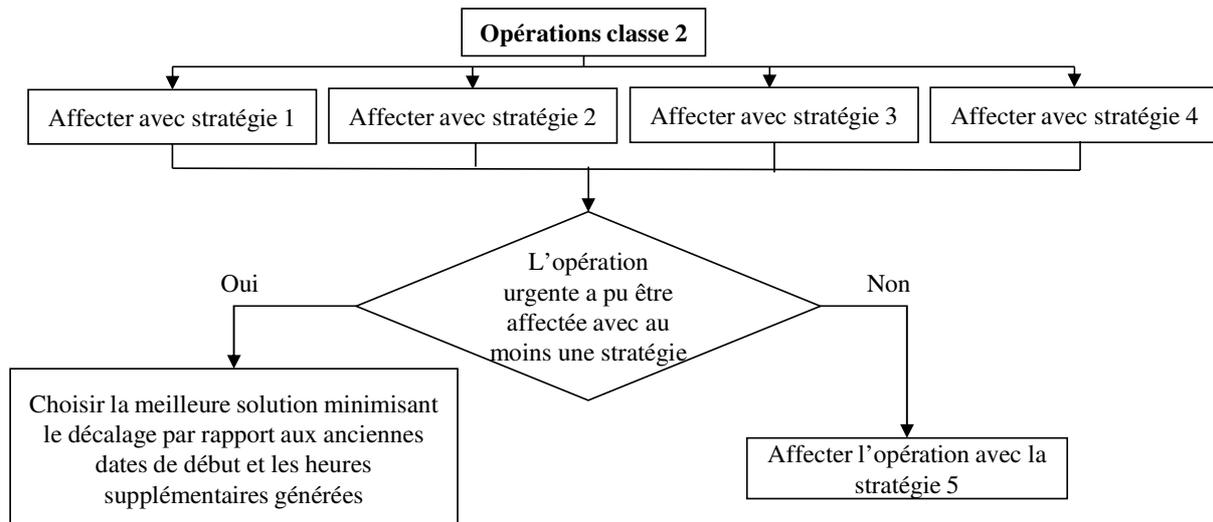
L'inconvénient majeur de ces deux méthodes, comme pour chaque méthode basée sur des prévisions, est que l'on peut (et que l'on va ...) se tromper. On peut se tromper, par exemple, sur la pathologie, sur la date et l'heure d'occurrence de l'urgence, sur le nombre de cas à traiter. Un autre inconvénient de ce genre de méthodes est qu'elles dégradent le taux de remplissage du bloc, dont on peut rappeler que c'était l'objectif des premiers travaux effectués. Si, un jour donné, il n'y a pas d'urgence, on se prive d'opérer au moins un patient, qu'il faudra donc opérer dans les jours suivants, peut être avec la survenue d'opérations urgentes, en nombre éventuellement supérieur à la prévision. C'est la raison pour laquelle nous avons proposé une méthode d'aide à la décision qui s'adapte, en temps réel, à un planning existant, proche de l'optimal, pour les opérations électives.

Toutes les opérations urgentes ne se valent pas. Pour les distinguer, il faut évaluer l'importance de l'urgence et graduer la réponse que l'on y apporte. En effet, chacun peut comprendre qu'une péritonite est prioritaire devant une fracture légère. Plusieurs références ont traité ce sujet et classent les opérations urgentes en fonction de leur gravité et du délai d'attente acceptable sans risque d'aggravation supplémentaire pour le patient.

Nous avons, en accord avec les responsables de l'hôpital Robert Pax, défini trois classes d'opérations urgentes :

- Classe 1 : Les opérations vitales, pour lesquelles une opération immédiate doit être envisagée, sous peine de sur-aggravation de l'état du patient.
- Classe 2 : Les opérations urgentes qui doivent être réalisées avant la fin de la journée.
- Classe 3 : Les opérations pour lesquelles l'état du patient permet un délai de quelques jours.

Pour chacune des classes d'opérations ainsi définies, nous avons proposé une méthode d'intégration au programme opératoire, dont nous donnons un exemple sur la figure 3-1, pour l'intégration des opérations urgentes de classe 2.



**Figure 3-1. Procédure d'affectation pour les opérations urgentes de Classe 2.**

Une opération vitale doit être effectuée le plus tôt possible, le jour de son arrivée. Dans le cas où toutes les salles opératoires sont occupées, même pendant les heures supplémentaires autorisées, on fait face à une alternative. Soit il est possible de reporter une opération de classe 3 vers la fin de la semaine, soit on autorise, exceptionnellement et uniquement pour ce type de cas, un dépassement des heures supplémentaires.

Pour les opérations urgentes de classe 2, nous avons proposé quatre méthodes d'intégration dans le planning :

1. On place l'opération urgente, au plus tôt, dans une des salles opératoires qui correspond à sa spécialité.
2. On place l'opération urgente, au plus tôt, dans une des salles opératoires, sans se soucier de la spécialité.
3. On place l'opération urgente dans un « trou » du planning, s'il existe et qu'il est de taille au moins égale à la durée de l'opération urgente. Sinon, on place l'opération urgente dans la salle qui se libère le plus tôt, pendant les heures supplémentaires autorisées.
4. On place l'opération urgente dans la salle qui se libère le plus tôt, pendant les heures supplémentaires autorisées.

Afin d'aider le responsable de bloc dans sa prise de décision, nous lui choisissons, parmi les résultats possibles, celui qui minimise soit les heures supplémentaires, soit le décalage par rapport au planning existant. Si, pour cette classe d'opérations, on est dans l'incapacité de placer l'opération urgente sans dépasser le plafond d'heures supplémentaires autorisées, alors on propose le transfert du patient vers un autre hôpital.

Les opérations urgentes de classe 3 sont affectées en fin de programme opératoire, le plus tôt possible au cours de la semaine, dans une salle opératoire de même spécialité.

Ce travail a été présenté à la 3<sup>ème</sup> conférence internationale sur le contrôle, la décision et les technologies de l'information (Bouguerra et *al.*, 2016). Il a aussi fait l'objet d'une publication en revue internationale (Bouguerra et *al.*, 2020).

### 3.3 Ré-ordonnement

Les problèmes d'ordonnement ont suscité un vif intérêt au cours de la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, et leurs extensions à de multiples cas particuliers continuent d'être un enjeu majeur pour les entreprises encore aujourd'hui avec, par exemple, la minimisation des déchets (Le Hesran et *al.*, 2020) ou l'allocation de ressources dans une ville connectée (Li, 2020). Grâce au développement technologique, l'industrie vit actuellement la 4<sup>ème</sup> révolution, dite Industrie 4.0. Cette réalité a un impact significatif sur le management des processus industriels. Désormais, un client peut, à tout moment, créer ou annuler une commande en temps réel grâce à des objets toujours plus connectés. Ce changement de situation a des conséquences sur l'ordonnement de la production. En effet, lorsqu'une nouvelle commande arrive ou dans le cas d'une annulation, le planning initial est perturbé, d'où la nécessité d'un ré-ordonnement pour réagir le plus rapidement possible, afin de satisfaire au mieux les clients.

L'objectif des travaux de thèse d'Ayoub Tighazoui est de développer des modèles mathématiques et des méthodes d'optimisation qui permettent de réordonner les jobs, en réponse à des perturbations causées par l'arrivée de nouveaux jobs, l'annulation de jobs, ou l'absence de composants. Dans ces travaux, nous mesurons la performance de ces systèmes par des critères d'optimisation qui combinent à la fois l'efficacité et la stabilité de l'ordonnement. Nous nous plaçons dans le cas où un ordonnement traditionnel existe, et qu'il est en cours de suivi par l'outil de production. A l'arrivée d'un événement fortuit, l'ordonnement n'est plus valide et doit être remis à jour rapidement, et de préférence en faisant peu de modifications. L'objectif est de garantir la meilleure réactivité possible des systèmes de production de biens ou de services face aux différents aléas qui peuvent survenir.

Dans cette thèse, nous considérons des systèmes de production flexibles soumis à des contraintes de blocages mixtes. Les différents environnements machines étudiés sont la machine unique, les machines parallèles, les flow shop classique et hybride. Le but est d'apporter les meilleures solutions possibles de ré-ordonnement de ces systèmes de production soumis aux aléas.

L'étude bibliographique sur les travaux traitant du ré-ordonnement a été menée selon les critères suivants : l'environnement des machines (machine unique, machines parallèles, flowshop, jobshop), les types de blocage ( $RSb$ ,  $RCb^*$ ,  $RCb$ ), les mesures de performance (efficacité, stabilité), les méthodes de résolution (exactes, approchées, hybrides) et les stratégies de ré-ordonnement (prédictive-réactive, dynamique, règles de distribution). A partir de cette étude, nous avons défini une nouvelle approche du ré-ordonnement. Nous avons considéré un nouveau critère d'optimisation combinant l'efficacité et la stabilité de l'ordonnement. L'efficacité est représentée par le temps d'attente moyen, pondéré par le poids du job. La stabilité est représentée par la déviation de la date de fin, pondérée par le poids du job.

Le premier modèle mathématique de ré-ordonnement que nous avons développé s'applique à une machine unique, sans blocage. A chaque fois qu'un nouveau job arrive, il est intégré à l'ensemble des jobs non encore exécutés et un ré-ordonnement est proposé, avec comme objectif la minimisation du multicritère efficacité/stabilité. Cette stratégie est connue dans la littérature sous le nom de stratégie prédictive-réactive. Lors de l'implantation de notre modèle sur le logiciel Mosel-Xpress, nous avons identifié que les jobs de faible poids sont placés en dernier dans la séquence, ce qui est logique. Cependant, dans la mesure où ils courent le risque de n'être jamais ordonnés, nous avons proposé d'augmenter leur poids après chaque occurrence d'une perturbation, ce qui permet de ne pas les faire trop

« s'attarder » dans le système. La résolution exacte de ce modèle n'est possible en un temps raisonnable que pour un nombre de jobs inférieur à 20. Ces travaux ont donné lieu à une publication soumise à la revue Journal of Manufacturing Systems (Tighazoui et al., 2020).

Le deuxième modèle que nous avons développé prend aussi en compte l'annulation de jobs dont le lancement des opérations n'a pas encore débuté, dans le cas de machines parallèles identiques. La résolution exacte de ce modèle nous a permis de faire une étude d'erreur relative de l'ordonnancement obtenu en *online* comparé à celui en *offline*, c'est-à-dire si nous avons connaissance de toutes les informations dès la date initiale de l'ordonnancement. Nous nous sommes également intéressés au nombre de jobs qui changent de machine après chaque perturbation. Ces résultats font l'objet d'un article en cours de soumission à Computers and Operations Research (Tighazoui et al., 2020).

Les paramètres du modèle mathématique *offline* du problème avec machines parallèles sont les suivants :

- $N$  : Ensemble des jobs  $\{1, 2, \dots, n\}$
- $K$  : Ensemble des rangs  $\{1, 2, \dots, n\}$
- $M$  : Ensemble des machines  $\{1, 2, \dots, nm\}$
- $j$  : Index sur les jobs,  $j=1, 2, \dots, n$
- $k$  : Index sur les rangs,  $k=1, 2, \dots, n$
- $m$  : Index sur les machines,  $m=1, 2, \dots, nm$
- $w_j$  : Poids du job  $j$
- $r_j$  : Date de disponibilité du job  $j$
- $p_j$  : Temps opératoire du job  $j$
- $\lambda$  : Constante suffisamment grande.

Les variables de décision du modèle sont les suivantes :

- $x_{jkm}$  : vaut 1 si le job  $j$  est placé en  $k^{\text{ième}}$  position sur la machine  $m$ , 0 sinon.
- $CP_{km}$  : date de fin du job placé en  $k^{\text{ième}}$  position sur la machine  $m$ .
- $SP_{km}$  : date de début du job placé en  $k^{\text{ième}}$  position sur la machine  $m$ .
- $C_j$  : date de fin du job  $j$ .
- $W_j$  : temps d'attente du job  $j$ .

Les équations du modèle mathématique sont les suivantes :

$$\text{Min} \sum_{j=1}^n w_j W_j \quad 3.11$$

Avec les contraintes suivantes :

$$\sum_{m=1}^{nm} \sum_{k=1}^n x_{jkm} = 1, \forall j \in N \quad 3.12$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jkm} \leq 1, \forall k \in K, \forall m \in M \quad 3.13$$

$$\sum_{j=1}^n x_{j(k+1)m} \leq \sum_{j=1}^n x_{jkm}, \forall k \in [1, \dots, n-1], \forall m \in M \quad 3.14$$

$$SP_{km} \geq \sum_{j=1}^n r_j x_{jkm}, \forall k \in K, \forall m \in M \quad 3.15$$

$$SP_{(k+1)m} \geq SP_{km} + \sum_{j=1}^n p_j x_{jkm}, \forall k \in [1, \dots, n-1], \forall m \in M \quad 3.16$$

$$CP_{km} = SP_{km} + \sum_{j=1}^n p_j x_{jkm}, \forall k \in K, \forall m \in M \quad 3.17$$

$$C_j \geq CP_{km} - \lambda(1 - x_{jkm}), \forall j \in N, \forall k \in K, \forall m \in M \quad 3.18$$

$$C_j \leq CP_{km} + \lambda(1 - x_{jkm}), \forall j \in N, \forall k \in K, \forall m \in M \quad 3.19$$

$$W_j = C_j - r_j - p_j, \forall j \in N \quad 3.20$$

$$CP_{km}, SP_{km}, C_j, W_j \geq 0, \forall j \in N, \forall k \in K, \forall m \in M \quad 3.21$$

$$x_{jkm} \in \{0,1\}, \forall j \in N, \forall k \in K, \forall m \in M \quad 3.22$$

La contrainte (3.12) indique que chaque job est affecté à une seule position dans une seule machine. La contrainte (3.13) précise qu'il ne peut pas y avoir plusieurs jobs à la même position dans une machine. La contrainte (3.14) précise que, si la position  $k$  n'est pas occupée, la position  $k+1$  n'est pas occupée non plus. La contrainte (3.15) garantit que la date de début d'un job est supérieure ou égale à sa date de disponibilité. La contrainte (3.16) assure les contraintes de précédence entre les opérations successives d'un job. L'équation (3.17) relie la date de début à la date de fin de chaque opération. L'équation (3.18) définit la date de fin de chaque job. La contrainte (3.19) est une coupe qui permet de réduire le temps de calcul. L'équation (3.20) calcule le temps d'attente de chaque job. La contrainte (3.21) rend toutes les variables positives. La contrainte (3.22) garantit une variable de décision binaire.

Les nouveaux paramètres et variables du modèle mathématique *online* sont les suivants :

- $n_j$  : nombre de nouveaux jobs
- $n'$  :  $n + n_j$
- $N'$  : ensemble des jobs  $\{1, 2, \dots, n'\}$
- $K'$  : ensemble des rangs  $\{1, 2, \dots, n'\}$
- $j$  : index sur les jobs,  $j=1, 2, \dots, n'$
- $k$  : index sur les rangs,  $k=1, 2, \dots, n'$
- $Co_j$  : date de fin originale du job  $j$  (obtenue par la résolution du problème initial).
- $\alpha$  : coefficient de balance entre efficacité ( $\alpha=1$ ) et stabilité ( $\alpha=0$ ).
- $x_{ojkm}$  : variable qui relie les jobs aux positions dans le problème initial.
- $SPO_{km}$  : date de début du job en  $k^{\text{ième}}$  position sur la machine  $m$  dans le problème initial.
- $t_d$  : date d'apparition d'une perturbation.
- $Ukm$  : vaut 1 si  $SPO_{km} < t_d$ , 0 sinon.

Les variables de décision  $x_{jkm}$ ,  $CP_{km}$ ,  $SP_{km}$ ,  $C_j$ ,  $W_j$  sont conservées dans le modèle *online*. Ainsi, la nouvelle fonction objectif est la suivante :

$$\text{Min } \alpha \sum_{j=1}^{n'} w_j W_j + (1 - \alpha) \sum_{j=1}^{n'-n_j} w_j (C_j - Co_j) \quad 3.23$$

Dans ce modèle *online*, nous avons utilisé les mêmes contraintes que celles qui sont déjà présentées dans le modèle *offline*. En outre, nous avons ajouté la contrainte (3.26) qui précise que les jobs doivent conserver leur place s'ils ont déjà démarré leur exécution. La contrainte (3.27) consiste à rendre la date de fin de chaque job supérieure ou égale à sa date de fin initiale.

$$x_{jkm} \geq x_{o_{jkm}} - \text{big}M (1 - U_{km}), \forall k \in K, \forall m \in M \quad 3.24$$

$$C_j \geq Co_j, \forall j \in N \quad 3.25$$

Nous continuons à développer des modèles mathématiques pour les systèmes de production de type flowshop et flowshop hybride. Puis, nous considérerons les contraintes de blocage mixtes, en les insérant dans les modèles, et nous développerons les heuristiques et méta-heuristiques qui nous permettront de traiter plus de jobs en un temps raisonnable, afin de fournir aux décideurs des méthodes de résolution de leurs problèmes efficaces et pertinentes en fonction de leurs besoins.

### 3.4 Applications au financement des immobilisations industrielles

Le contexte économique difficile que traverse notre pays depuis plusieurs années impose ses contraintes avec toujours plus de violence aux entreprises, dans une économie mondialisée impitoyable. Dans ce contexte concurrentiel, une entreprise peut gagner de la marge, soit en produisant plus de produits, soit le même nombre en un temps plus court, soit encore les deux. Ainsi, pour améliorer sa productivité dans un contexte de forte demande pour ses produits, une entreprise peut décider de faire un investissement sur de nouvelles machines lorsqu'elle identifie un goulot d'étranglement dans son processus de fabrication. Une modélisation analytique efficace des gains financiers générés par l'amélioration de la productivité, comparée aux dépenses effectuées pour l'amélioration du système de production peut s'avérer utile pour les décideurs.

Dans la littérature scientifique, quelques études portent à la fois sur le modèle d'investissement et les problèmes d'ordonnancement. Un modèle mathématique a été proposé pour l'ordonnancement d'un système à un seul processeur, avec pour objectif la minimisation des coûts d'exploitation globaux, et avec la prise en compte du coût de détention des stocks, du coût d'opportunité dû au retard dans la réalisation des recettes, de l'effet de la spirale inflationniste, et de la valeur temporelle de l'argent (Amar et Xiao, 1997). L'ordonnancement d'une machine a été abordé, sous contraintes d'incertitude du marché avec une méthode de séparation et d'évaluation (Szmerekovsky, 2007), ou avec des tâches dont la valeur décroît de façon exponentielle avec le temps (Voutsinas et Pappis, 2002). L'ordonnancement de machines parallèles a été abordé avec l'intégration de la gestion de trésorerie à la fonction objectif (Gohareh et al., 2014). L'ordonnancement de projets a également été abordé, avec la proposition d'une nouvelle technique d'ordonnancement qui déplace des ensembles d'activités pour améliorer la valeur actualisée nette du projet, en fonction du coût des tâches à réaliser (Leyman et Vanhoucke, 2015).

Nous avons développé un modèle d'investissement dans de nouveaux moyens de production, qui tient compte aussi bien des aspects financiers que de l'ordonnancement (Sauvey et Trabelsi, 2019). Le système de production que nous avons modélisé pour cette étude est du type flowshop hybride. Ainsi, l'insertion de nouvelles machines dans le processus de fabrication n'en change pas la nature. Afin de pouvoir calculer les productivités des différents étages, nous avons traduit les données de départ en capacités de production. Pour le côté

financier, nous avons modélisé l'emprunt de la somme correspondant à l'achat des nouvelles machines auprès d'une banque.

Ce modèle évalue un projet d'investissement sur des ressources supplémentaires (des machines, par exemple), pour lequel la rentabilité dépend de la solution du problème d'ordonnancement. Seuls deux travaux se sont intéressés à l'évaluation des options réelles : le premier s'est intéressé à l'incertitude du marché et la flexibilité managériale pour évaluer la pertinence d'un nouvel achat de ressources de production (Yeo et Qiu, 2003), et le second s'est attaché à mesurer la flexibilité dans les décisions d'investissement (Abele *et al.*, 2006). Notre travail porte, dans un premier temps, sur la détermination du retour sur un investissement dans les ressources de production dans un contexte économique de forte demande sur le produit fabriqué. Par la suite, nous nous intéresserons aux cas où plusieurs produits sont fabriqués sur la même ligne de production, puis avec des commandes pas forcément supérieures aux capacités de production.

Les hypothèses faites pour l'élaboration de ce modèle sont les suivantes. Il est analytique, c'est-à-dire très facile à calculer, et ne fait pas appel à des variables aléatoires. Les variables d'entrée modélisent le système de production dans son état actuel (initial) et les paramètres de sortie modélisent ce même système dans un état final qui dépend des décisions prises, les variables de décision. Ces variables de décision sont le nombre de machines achetées à chaque étage du flowshop hybride, pour chacune desquelles on connaît les caractéristiques principales, comme les cadences de production par exemple. Les données du modèle sont le nombre de machines à chaque étage, la quantité de ressources humaines en fonction du nombre de machines à chaque étage et leur salaire, les vitesses de production, avec lesquels il est possible de calculer les coûts par pièce produite et les bénéfices par unité de temps qui permettent d'en tirer une date de retour sur investissement.

Ce modèle mathématique a été testé avec un exemple industriel de fabrication de portail. Il résout le problème intégré de l'investissement/planification, dans le cas particulier du contexte d'une demande sûre sur un seul produit fabriqué sur la ligne de production considérée. Il peut être utilisé comme modèle de simulation, permettant ainsi aux décideurs de prendre des décisions successives sur plusieurs étages de la ligne. Puisque les équations sont analytiques, il est facilement transposable à tout cas réel, mais il peut également servir comme modèle pédagogique, car les deux notions principales, financière et ordonnancement, sont aisément accessibles. De plus, il peut également servir de modèle d'optimisation. En effet, couplé à une méthode d'optimisation, comme un algorithme génétique par exemple, on peut trouver quels sont les différents étages sur lesquels investir, et quelles quantités de machines acheter sur quels étages, pour maximiser le bénéfice par pièce produite par exemple, ou encore diminuer le temps de retour sur investissement.

Ce travail a été présenté lors de la 5<sup>ème</sup> conférence internationale sur les projets et la logistique (Sauvey et Trabelsi, 2019), et fait actuellement l'objet d'une soumission dans une revue, dans une version étendue.

### 3.5 Optimisation des performances pour le développement durable

Dans le cadre de mes travaux au sujet du développement de méthodes d'optimisation, j'ai été sollicité par deux collègues du laboratoire, membres de l'équipe MPM (Management de la Production et de la Maintenance), pour développer une stratégie d'optimisation qui soit adaptée à leurs modèles, dont voici résumées les principales fonctions et hypothèses.

Conséquemment aux législations environnementales rigoureuses et à la rude concurrence économique mondiale, un nombre croissant d'entreprises se consacrent à la récupération et au reconditionnement des produits usagés. Ainsi, au cours des dernières décennies, la gestion des systèmes de fabrication/reconditionnement a suscité une attention croissante de la part des chercheurs et des dirigeants d'entreprises.

Afin que le modèle du système de fabrication écologique soit plus réaliste, nous supposons que les produits neufs et reconditionnés sont discernables, que la quantité de produits retournés dépend des ventes au cours des périodes précédentes. Les pannes sur les machines sont stochastiques et indépendantes, et les périodes de réparation sont prises en compte dans le modèle. Enfin, les produits reconditionnés sont perçus comme de qualité inférieure par rapport aux neufs, donc moins chers, et le temps de transport a un impact sur la gestion des stocks.

Les modèles développés par mon collègue sont stochastiques et basés sur une simulation temporelle. Ces deux caractéristiques principales font que :

- comme le modèle est stochastique, lancer le même modèle avec les mêmes paramètres d'entrée ne fournit pas les mêmes valeurs de paramètres de sortie,
- comme le modèle est basé sur des simulations temporelles, il prend un temps de calcul non négligeable devant la méthode d'optimisation, avant de fournir un résultat.

Une difficulté supplémentaire semble venir du fait que, dans la zone où nous avons trouvé les solutions optimales, l'espace des solutions semble plus « plat » que « convexe », ce qui ne facilite jamais le processus d'optimisation. C'est dans ce contexte que j'ai développé des méthodes d'optimisation pour les modèles de performances pour le développement durable, stochastiques et basés sur des simulations temporelles.

Dans le premier modèle sur lequel j'ai collaboré, illustré par la figure 3-2, nous avons travaillé sur une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée fabrication-reconditionnement-transport-entrepôt, composée de deux machines pour la fabrication et le reconditionnement, un stock de fabrication, un entrepôt, le véhicule de transport et le stock de produits récupérés. Le modèle prend en compte le retour des produits de fin de vie. Les produits manufacturés et reconditionnés sont stockés ensemble, dans le stock de fabrication. Les produits en fin de vie sont stockés dans le stock produits de récupération en vue de leur reconditionnement. Le véhicule transporte des produits du stock de fabrication à l'entrepôt. L'objectif de ce travail est d'évaluer simultanément les capacités optimales du stock de fabrication, de l'entrepôt et du véhicule, ainsi que le nombre optimal des produits en fin de vie retournés (Turki et *al.*, 2017).

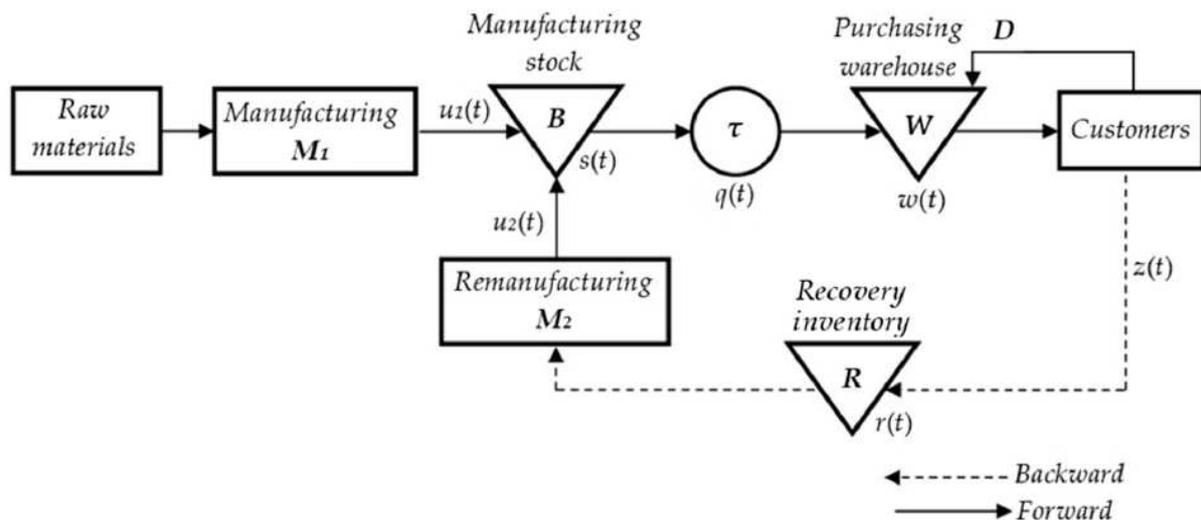


Figure 3-2. Chaîne d’approvisionnement en boucle fermée (Turki *et al.*, 2017).

Dans le deuxième travail, deux modèles sont développés, prenant en compte les émissions de carbone ou non, afin de déterminer les valeurs optimales des durées des périodes de fabrication/reconditionnement et des capacités de stock des articles neufs et reconditionnés. Grâce au développement de ces méthodes d’optimisation, nous avons pu mener des études illustrant l’impact des coûts d’installation, du pourcentage d’articles retournés, de la disponibilité des machines, du plafond de carbone et du prix du carbone sur la planification optimale du stockage et de la production, de même que caractériser l’influence du plafond d’émission de carbone, du prix du carbone et du pourcentage d’articles retournés sur les émissions de carbone (Turki *et al.*, 2018). Ces méthodes d’optimisation nous ont permis de gagner du temps pour l’obtention des résultats.

Dans le troisième travail, nous recherchons une conception optimale du système de fabrication-reconditionnement-transport, tout en tenant compte de la distinction entre produits neufs et reconditionnés, et des activités de transport entre la fabrication et le reconditionnement, les magasins et les entrepôts dans les villes. Le système de fabrication / reconditionnement est composé de deux machines parallèles, les stocks de produits fabriqués et de produits reconditionnés, les entrepôts, les véhicules de transport et le stock de produits récupérés. L’objectif est de déterminer les capacités optimales des stocks de fabrication et de reconditionnement, des entrepôts, des véhicules de transport, ainsi que le pourcentage optimal de produits retournés (Tighazoui *et al.*, 2019).

L’originalité du quatrième travail consiste à considérer simultanément les stratégies d’émission de carbone, la taxe sur le carbone et les émissions obligatoires dans les systèmes de fabrication et de reconditionnement. Le modèle proposé est composé de deux machines parallèles, d’un stock de fabrication, d’un stock de reconditionnement et d’un stock de reprise. Le but de ce travail est de déterminer les capacités optimales des stocks de fabrication et de reconditionnement qui maximisent le profit total, ainsi que la valeur optimale des produits retournés, sous deux limites d’émissions de carbone. Les résultats montrent l’impact de la période de limitation de carbone et du pourcentage de produits retournés sur les variables de décision (Turki *et al.*, 2020).

Pour conclure, ces travaux ont montré que j’ai su relever plusieurs défis : développer des méthodes d’optimisation pour des modèles que je n’ai pas développés, et développer une stratégie d’optimisation pour des modèles dont le temps de calcul n’est pas négligeable devant celui qu’il faut pour faire fonctionner la méthode d’optimisation.

### 3.6 Modélisation et optimisation des problèmes de localisation

Les défis qui ont été relevés au cours de ces travaux sont à la fois le travail en collaboration internationale et le travail de modélisation et d'optimisation à partir d'une feuille blanche sur un problème totalement nouveau pour moi.

Ces travaux ont été menés avec le Professeur Teresa Melo, de la HTW Saar à Sarrebruck en Allemagne, et le Dr. Isabel Correia, de la Universidade NOVA de Lisboa à Lisbonne au Portugal.

Nous abordons une extension du problème classique de localisation d'installations multi-périodes, en considérant que les clients sont sensibles aux délais de livraison. Certains clients exigent que leurs demandes soient satisfaites à temps, tandis que les autres acceptent des livraisons retardées, pour autant que le retard ne dépasse pas un seuil prédéterminé. Dans ce cas, les envois en retard peuvent survenir au plus une fois pendant le délai de livraison, c'est-à-dire qu'une commande ne peut pas être fractionnée sur plusieurs périodes.

Au début de l'horizon de planification, un certain nombre d'installations existent avec des capacités de production données. Un ensemble fini de sites potentiels avec plusieurs niveaux de capacités de production possibles est disponible. L'objectif du travail est de trouver les emplacements optimaux et les capacités qui doivent y ouvrir, respectivement fermer, ainsi que les dates auxquelles les ouvertures et les fermetures de sites adviendront. Naturellement, les installations doivent offrir une capacité suffisante pour satisfaire toutes les demandes des clients, à un coût total minimal.

Les coûts fixes d'ouverture, de fermeture et d'exploitation des installations sont pris en compte, ainsi que les coûts variables de traitement, de transport et de retard. Ces derniers sont dus lorsque la commande d'un client est traitée en retard.

Pour ce problème, un modèle mathématique linéaire en nombres entiers avait déjà été développé, mais les expériences avec des instances générées aléatoirement ont montré que CPLEX ne trouve pas de solutions optimales pour 84% des instances, pendant un temps de résolution de 10 heures (Correia et Melo, 2016). Dans certains cas, le solveur ne parvient même pas à identifier des solutions réalisables dans ce délai. Pour faire face à ces défis, nous avons proposé plusieurs heuristiques qui construisent des solutions de manière itérative. Nous avons également proposé deux améliorations locales qui se sont révélées efficaces (Sauvey et *al.*, 2020).

On peut voir sur la figure 3-3 un horizon de planification de 3 ans, pour lequel on autorise une prise de décision stratégique chaque début d'année (mois 1, 13 et 25). Ces décisions concernent l'ouverture d'un site, la modification de sa capacité de production ou sa fermeture. Pour chaque période de l'horizon de planification (chaque mois sur l'exemple), on prend les décisions tactiques qui concernent la détermination du plan de production ainsi que la distribution des marchandises produites par chacune des usines vers chacun des clients. Les clients du groupe 1 doivent être servis sans retard, alors que ceux du groupe 2 acceptent un délai pour leur livraison, en contrepartie d'une pénalité qui augmente en fonction du retard.

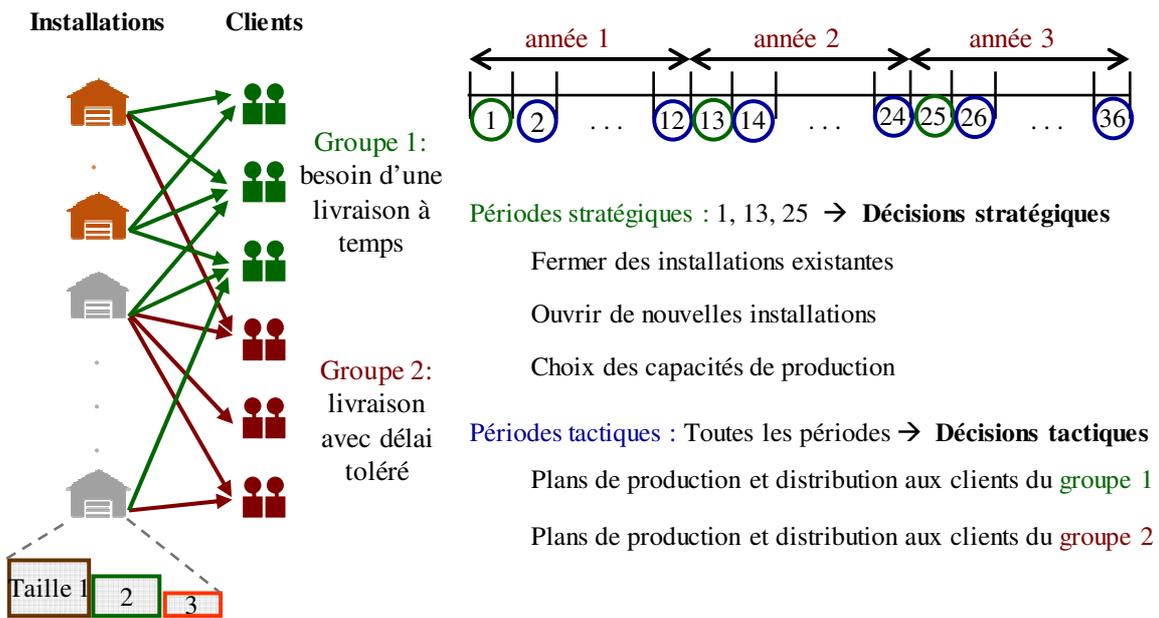


Figure 3-3. Présentation du problème de localisation (Correia et al., 2019).

Les heuristiques que nous avons proposées pour la résolution de ces problèmes se décomposent en deux phases. Dans la première phase, un sous-ensemble des emplacements initialement existants et candidats sont choisis, et la deuxième phase alloue l'ensemble des demandes des clients aux capacités de production en fonctionnement sur l'ensemble de la période. En général, l'ensemble des emplacements existants est insuffisant pour couvrir l'ensemble de la demande des clients sur la période étudiée.

Quatre procédures sont utilisées pour proposer des décisions d'emplacement. La première procédure trie les emplacements candidats par coût moyen croissant, et en ajoute suffisamment pour couvrir la demande moyenne sur la période. Si, lors de l'allocation des demandes aux capacités de production, la seconde phase de l'heuristique ne trouve pas de solution viable, alors on relance la procédure avec, cette fois-ci, une demande égale à la demande moyenne +  $m=1$  fois l'écart-type de la demande sur la période. En procédant ainsi, jusqu'à  $m=3$  s'il en est besoin, nous pouvons garantir au client de trouver une solution viable au problème posé. Dans le cas où on trouve une solution directement avec  $m=0$ , on itère sur  $m$  dans l'autre sens, jusqu'au moment où on ne trouve plus de solution viable avec la seconde procédure d'allocation. La deuxième procédure agit comme la première pour les installations candidates, mais peut choisir de fermer une installation existante dès le départ de l'horizon de planification, si elle est évaluée comme trop coûteuse. Les heuristiques 3 et 4 utilisent respectivement les résultats des heuristiques 1 et 2, mais essaient successivement, parmi les classements qui ont été effectués, à nombre d'emplacements constants correspondants à la solution trouvée, les emplacements candidats suivants, jusqu'à trouver une meilleure solution.

Les deux améliorations locales développées proposent soit de retarder l'ouverture des nouvelles installations le plus tard possible, soit de fermer des installations existantes le plus tôt possible, pourvu que la solution reste toujours réalisable.

Les résultats sur les instances de test démontrent l'efficacité des méthodes heuristiques proposées. Contrairement à ceux obtenus avec CPLEX, toutes les heuristiques constructives identifient une solution réalisable, pour chaque instance, en un temps de calcul très court. La valeur moyenne de l'objectif avec les heuristiques est 2,49% supérieure à l'objectif de

meilleure solution fournie par CPLEX, quand cette solution existe. Ce taux diminue à 0,72% après l'utilisation des programmes d'amélioration locale, qui sont aussi très rapides. De plus, l'association des heuristiques avec les améliorations locales fournit des solutions de qualité supérieure à celles trouvées par CPLEX lorsqu'il ne trouve pas la solution optimale, pour 19% des instances.

Les travaux sur cette thématique se poursuivent dans plusieurs directions. Pour l'instant, nous travaillons sur le cas où les capacités de production des sites sont modulaires. Chaque module a une capacité de production constante et il est possible de fermer ou d'ouvrir des modules sur un site, dans la limite d'un nombre de modules maximal. A moyen terme, nous travaillerons sur le cas où les clients qui acceptent une livraison retardée acceptent aussi une livraison en plusieurs colis. Ce problème est un peu plus compliqué, mais nous nous attacherons aussi à proposer des heuristiques pour sa résolution.

### 3.7 Conclusion et contribution scientifique

J'ai présenté dans ce chapitre plusieurs travaux que j'ai effectués pour modéliser les systèmes de production de biens et de services, tels que les nouvelles immobilisations industrielles et le ré-ordonnancement d'une part, la modélisation des programmes opératoires et l'intégration des opérations urgentes d'autre part.

J'ai aussi travaillé sur la conception et le développement de méthodes d'optimisation efficaces. D'abord, sur le thème du ré-ordonnancement, j'ai proposé de nouvelles méthodes afin d'adapter l'ordonnancement aux nouvelles façons de consommer apparues avec les nouveaux outils de communication. Ensuite, j'ai développé des liens avec les chercheurs de mon laboratoire, donc proches physiquement et amicalement, mais avec de nouveaux challenges scientifiques à la clé que nous avons relevés et qui nous ont permis d'avancer. Enfin, ces réussites m'ont amené à me lancer dans une collaboration scientifique à l'échelle européenne sur un thème nouveau, l'optimisation sur des problèmes de localisation de moyens de production multi-périodes, avec différents niveaux de services au client.

Pour résumer les verrous scientifiques de ce chapitre, on peut rappeler les points suivants :

- La compréhension du besoin du client.
- L'agilité qui doit en résulter, aussi bien en termes de modélisation que de création de méthodes d'optimisation.
- La création de modèles, adaptés aux besoins du client, qui sont différents à chaque nouvelle création de modèle : Un modèle mathématique linéaire classique pour l'ordonnancement des opérations non-électives, un modèle *offline* combiné à un modèle *online* et la résolution optimale successive de problèmes d'ordonnancement à chaque apparition d'une perturbation pour le ré-ordonnancement, modèle analytique pour le financement des immobilisations industrielles, modèle de simulation stochastique pour les problèmes de fabrication-reconditionnement, avec discrétisation de la variable temps, de même que pour le modèle déterministe créé pour la modélisation des problèmes de localisation.
- L'adaptation aux spécificités des modèles lors de la création de méthodes d'optimisation. Une méthode d'optimisation classique a été utilisée sur le modèle de financement des immobilisations industrielles. Elle a été fortement repensée pour s'adapter au modèle stochastique des problèmes de fabrication-reconditionnement, en tenant compte du fait particulier que le temps d'évaluation d'une solution n'est pas négligeable devant celui

utilisé pour faire fonctionner la méthode d'optimisation. Enfin, l'utilisation des contraintes spécifiques au problème de localisation ont permis la création d'heuristiques performantes.

Enfin, les modèles donnent à leur utilisateur non seulement une représentation mathématique des systèmes qu'ils représentent, mais aussi la possibilité de pratiquer l'optimisation par rapport au critère de leur choix. Cette optimisation peut lui donner un avantage concurrentiel, à la condition que la méthode d'optimisation soit performante et adaptée à son modèle.

C'est cette capacité d'adaptation de la méthode d'optimisation au modèle que je propose de questionner dans les prochaines années, et pour laquelle je donne quelques pistes de réflexion dans le chapitre suivant. Au cours de ces dernières années, grâce à l'expérience accumulée, j'ai tissé des liens avec différents horizons. J'envisage de suivre ce chemin dont j'ai déjà commencé la trace, et présente, dans le chapitre suivant, quelques projets que je propose de développer dans les années qui viennent, afin de me confronter à des problèmes et horizons toujours plus divers, dans le but de faire progresser encore mes méthodes et mes stratégies, pour la modélisation comme pour l'optimisation.



# Chapitre 4 : Perspectives pour la modélisation et l'optimisation

## 4.1 Introduction

Ce dernier chapitre a pour objectif de présenter les perspectives que j'envisage pour mes futures activités de recherche. Celles-ci s'inscrivent évidemment dans la continuité de ce que j'ai réalisé jusqu'à présent, mais je vais élargir le champ des contributions que l'on peut envisager à plus ou moins long terme. L'objectif principal reste le même : proposer des modèles qui aident à la décision et des méthodes d'optimisation qui permettent de trouver des solutions viables à des problèmes toujours plus complexes.

Dans ce chapitre, je présente trois perspectives de recherches en direction desquelles j'ai l'intention de poursuivre mes efforts dans les années qui viennent. La première concerne la modélisation et l'optimisation du financement des systèmes de production de biens et de services. La deuxième concerne le développement de méthodes et de stratégies d'optimisation sur des modèles mixtes, et la troisième s'intéresse aux méthodes de recherche opérationnelle appliquées à l'ordonnancement.

## 4.2 Modélisation et optimisation du financement des systèmes

Le financement des systèmes est une problématique qui est étudiée dans la littérature, sur un grand nombre de domaines, parmi lesquels on peut néanmoins déterminer, hormis tous les travaux sur le financement et les banques, deux grandes tendances : l'énergie et l'environnement d'une part et les recherches universitaires d'autre part.

Parmi les systèmes dont le financement fait l'objet d'études approfondies, on trouve celui lié aux énergies renouvelables, dans le contexte international (Raikar et Adamson, 2020), ou dans un contexte plus particulier comme celui de certains pays, comme les Etats-Unis (Krupa et Harvay, 2017), l'Afrique du Sud (Baker, 2015), les pays d'Afrique Sub-saharienne (Opayemi et *al.*, 2019), ou encore celui des zones côtières de l'Italie (Martino et Amos, 2015). Une comparaison a été effectuée entre le financement des recherches sur l'énergie océanique entre le royaume uni et les Etats-Unis (Jeffrey et *al.*, 2014). On trouve également des travaux sur les systèmes de stockage d'énergie sur le réseau électrique (Byrne et *al.*, 2017).

Le financement de la recherche et des universités est également un sujet questionné (Fan et *al.*, 2019). Les projets étudiants sont étudiés comme un sujet de financement (Henson, 2019). Par ailleurs, le financement public de la recherche sur la recherche d'énergie fait également l'objet d'études (Murray, 2017). Un état de l'art sur le financement de l'innovation a récemment été publié (Hahn et *al.*, 2019).

Les références qui traitent de la gestion des actifs en rapport avec le milieu industriel sont très rares. La récente revue de littérature effectuée (Polenghi et *al.*, 2019) ne contient, parmi les très nombreuses publications concernant la gestion d'actifs, que 27 travaux concernant les sources de risque dans le secteur industriel. Cinq catégories de sources de risques y sont identifiées, l'équipement, la gestion de l'information, le facteur humain, l'organisation de la structure et les fournisseurs. Deux chercheurs milanais, Irène Roda et Marco Macchi, s'intéressent à la gestion d'actifs dans le milieu industriel (Roda et Macchi, 2018). Le financement du développement industriel en Corée a également été étudié (Lee, 2017), de même que l'impact des programmes-cadres créés par l'Union européenne sur la compétitivité des entreprises (Aguiar et Gagnepain, 2017). Une étude sur la prévision des cours de la

crypto-monnaie dans un système de finance industriel a également été publiée récemment (Poongodi et *al.*, 2020). Récemment, l'ordonnancement de problèmes de type flowshop a été abordé sous l'angle de la maximisation des profits que l'on peut en tirer (Liu et *al.*, 2020). Le problème résolu est double : au niveau tactique, on choisit de traiter ou rejeter un job, et au niveau opérationnel, les jobs retenus sont ordonnancés.

Le positionnement des travaux que je propose dans cet axe concernent la modélisation analytique et l'optimisation du financement des systèmes industriels, en lien avec l'ordonnancement. Ces travaux concerneront l'acte d'investissement sur l'outil de production lui-même, et s'intéresseront aux perspectives de retour sur l'investissement lors de la prise de décision. Les prises de décisions se feront sur l'achat de nouveaux matériels de production ainsi que sur les paramètres relatifs à la matière première, la main d'œuvre et la maintenance. La revue de bibliographie que j'ai menée sur cet axe de travail particulier me permet d'écrire que, aujourd'hui, à ma connaissance, aucune publication n'a abordé ce sujet particulier.

Nous avons créé un modèle d'investissement dans de nouveaux moyens de production sur un système de type flow shop hybride, en tenant compte aussi bien des aspects financiers que de l'ordonnancement (Sauvey et Trabelsi, 2019). Nous avons le projet de développer ce modèle original en prenant en compte de plus en plus de paramètres, afin de l'affiner et de le rendre le plus proche possible des attentes potentielles des décideurs qui pourront s'y intéresser.

Dans sa première version, ce modèle ne prenait en compte qu'un seul produit sur la chaîne de production (Sauvey et Trabelsi, 2019). Nous supposons en outre que la demande sur le produit en question était supérieure aux capacités de production initiales du système.

Dans le modèle auquel nous souhaitons aboutir, nous prendrons en considération un nombre  $n$  de références différentes à fabriquer, avec la prise en compte des demandes prévisionnelles pour chaque référence, sur une période correspondante à celle du prêt envisagé. De plus, ces demandes ne seront pas forcément supérieures aux capacités de production, de sorte que la pertinence d'un investissement soit, elle-aussi, discutable. Ces deux aspects sont un atout de poids pour que le modèle se rapproche des conditions réelles de l'utilisation que nous lui destinons. A la suite d'une discussion au sujet de ce projet avec un expert-comptable, j'ai décidé d'inclure aussi les coûts fixes à ce modèle, toujours afin de permettre une meilleure approche des problèmes tels qu'ils se posent dans le monde industriel. Les coûts fixes concernent l'amortissement des machines et des bâtiments, les salaires des personnels administratifs, ou encore l'entretien des bâtiments, et d'une façon générale tous les coûts qui s'imposent à une entreprise, même si aucun produit n'est fabriqué ou vendu au cours de la période.

La prise en compte des demandes réelles en fonction de la référence conduiront à la prise en compte de la variable temps dans ces modèles, ce qui est toujours un challenge délicat à relever. Le modèle existant permet déjà une prise de décision du type achat ou non d'une ou plusieurs nouvelles machines dans un système de production modélisable par un flow shop hybride. L'utilisation de ce modèle dans un environnement d'optimisation permettra d'identifier jusqu'où les investissements réalisables pourront être rentables, et donc de déterminer à partir de quelle valeur d'investissement il est souhaitable d'arrêter. Les premiers essais d'optimisation réalisés sur le modèle existant permettent déjà d'obtenir des résultats intéressants, dans le cas d'un flowshop hybride, mais pourront être étendus aux cas de systèmes plus complexes, tels que les jobshops hybrides.

A l'avenir, l'utilisation de méthodes d'optimisation couplées avec ces modèles, qui prennent en compte l'ordonnancement sous la forme de cadences de production différentes en fonction des jobs et des étages, permettra d'optimiser le financement de nouvelles machines afin d'obtenir un retour sur investissement le plus rapide possible, ou encore un bénéfice le plus

gros possible. Elles permettront également d'évaluer plusieurs stratégies de financement sur un même projet, ou encore de comparer deux méthodes de développement.

### **4.3 Modélisation et optimisation sur des modèles mixtes**

La modélisation des systèmes s'est fortement améliorée au cours des dernières décennies. La notion de modèle elle-même doit être précisée ici, car elle revêt plusieurs acceptions en fonction du contexte dans lequel le mot est employé. Dans un premier contexte, que je qualifierai d'industriel, on parle de modèle pour un ensemble d'informations qui permet de décrire l'état d'un système de production. Ces informations peuvent être présentées sous la forme de feuilles de calcul bien sûr, mais aussi de graphiques ou de texte. L'objectif visé n'est pas forcément et uniquement un calcul, donc encore moins le couplage à une méthode d'optimisation, mais plutôt le partage d'information, de sorte à la rendre compréhensible par le public visé. Dans un second contexte, que je qualifierai d'académique, un modèle est un ensemble d'équations entre plusieurs variables, dont l'auteur a pris soin de les définir précisément, ainsi que leur domaine de définition. A partir d'un ensemble de paramètres d'entrée donné, ce modèle donnera, soit toujours le même ensemble de valeurs de sortie s'il est déterministe, soit à chaque fois un ensemble différent s'il est stochastique. Dans cette partie introductive, j'utilise le mot modèle dans sa première acception, alors que quand j'aborderai l'optimisation des modèles mixtes, j'utiliserai la seconde.

Dans le domaine de la modélisation, on peut observer que trois tendances sont en cours : le besoin de modèles, l'amélioration de leur qualité, et leur démocratisation, grâce à des outils faciles d'accès et performants.

D'abord, nous pouvons observer une évolution des besoins en termes de modèles. A tous les étages de notre société, la confiance et la reconnaissance de l'engagement ont évolué vers un besoin de justification, de la moindre dépense comme de la moindre recette. Maintenant, la justification des frais ou des dépenses est devenue une obligation absolue, y compris pour nos parlementaires, désormais respectivement soumis au contrôle de commissaires aux comptes et à la Haute Autorité de la Transparence de la Vie Publique (HATVP).

Ensuite, les outils, toujours plus nombreux, permettent une évolution dans la qualité des modèles. Les outils de modélisation sont également plus précis et proposent plus de possibilités. La palette de graphiques que permet de réaliser le logiciel Excel en est un exemple frappant. Tout un chacun peut présenter un travail d'analyse de données très rapidement et sans effort avec un résultat professionnel. Bien sûr, pour la création d'un modèle formalisé en un ensemble d'équations, des outils plus adaptés existent. Par exemple, voici un extrait des arguments publicitaires pour le logiciel Mathcad 15.0 : « La facilité d'utilisation du logiciel permet un démarrage rapide. Ses puissantes fonctions et sa notation mathématique avec prise en charge des unités permettent de créer et de documenter des calculs complexes vérifiables et partageables avec des collègues ». Quasiment tout est dit dans cette phrase : la création d'un modèle est devenue l'affaire de tous dans une entreprise, et surtout elle doit pouvoir être partagée facilement avec d'autres personnes. C'est-à-dire que le modèle doit être présentable et compréhensible, vérifiable et validable, donc les feuilles de calcul doivent être documentées avec des calculs, mais aussi des graphiques et du texte. C'est volontairement que je n'évoque pas les outils scientifiques professionnels que sont, par exemple, Matlab ou Flux.

Enfin, les outils de modélisation sont aussi devenus de plus en plus faciles d'emploi. Sous le couvert d'un besoin de transparence mis en avant dans toutes les couches de la société, chacun reçoit l'injonction de devenir un modélisateur et d'encoder son savoir dans un modèle.

L'activité de modélisation s'est donc bien largement démocratisée, sous l'impulsion des décideurs, afin qu'ils aient accès, informatiquement, à tous les endroits de leur entreprise. Si on fait une analogie avec l'automatique continue, dont le schéma générique est représenté sur la figure 4-1, on peut décrire cela comme un besoin en commandabilité de leur entreprise, vue comme le système à commander.

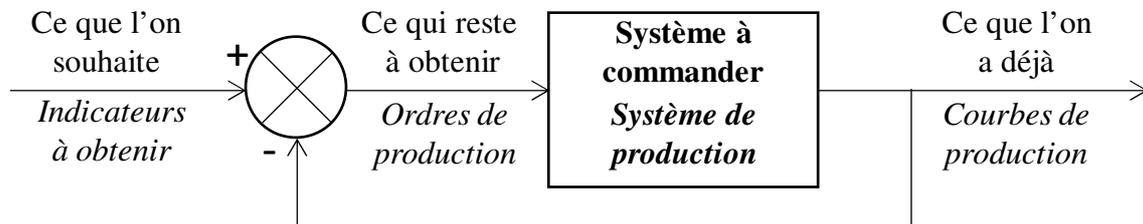


Figure 4-1. Boucle de commande d'un système en automatique continue.

Pour ce qui concerne l'optimisation, cette multiplication des modèles est à la fois un atout et un challenge à relever.

C'est d'abord un atout, car chaque nouveau modèle est un enjeu d'optimisation potentiel. Plus il existe de modèles, et plus le métier d'optimisateur devient passionnant. En effet, chaque modèle contient de l'information, et les optimisations que l'on peut effectuer sur celui-ci permettent d'en tirer quelque chose de plus. Si le modèle présente une faiblesse, alors la méthode d'optimisation la révélera et fournira ainsi une piste d'amélioration. Si, au contraire, le modèle est fiable sur le domaine des solutions visité par la méthode d'optimisation, celle-ci fournira alors à l'utilisateur l'information optimale qu'il peut en tirer.

C'est aussi un nouveau challenge à relever, car les « nouveaux modélisateurs » n'ont pas forcément suivi les études académiques au cours desquelles on apprend à clarifier des hypothèses, commenter les équations, valider le modèle et surtout en tester les limites, la zone de confiance et l'erreur relative que l'on peut en attendre. Une grande partie de ces notions échappent aux nouveaux modélisateurs. On peut donc considérer que les modèles leur échappent également.

Dans ce nouveau contexte, le challenge qu'il me paraît important de relever est celui de l'adaptation des méthodes d'optimisation aux modèles. Je propose donc de développer, dans les années à venir, un *environnement d'optimisation auto-adaptatif*, qui sera capable de prendre en compte des *modèles mixtes*. Il reposera donc sur deux axes de travail complémentaires. Le premier concerne la prise en compte, simultanée, avec le même niveau d'importance, des variables continues et discrètes d'un modèle. Le second axe concerne l'optimisation auto-adaptative, capable de s'adapter à la fois au modèle et aux souhaits de l'utilisateur. Je présente, dans ce qui suit, les réflexions relatives à la proposition de ces deux axes de travail.

J'ai proposé un axe de recherche dans le projet campus d'exception sur le thème « Modélisation mixte et méthodes d'optimisation ». Si ce projet est accepté par les financeurs, j'encadrerai une thèse sur ces deux axes de recherche.

### 4.3.1 Optimisation des modèles mixtes.

Ce qui crée la relative originalité de cette définition est la prise en compte, *au même niveau d'importance*, des variables continues et discrètes.

En effet, lorsque l'on crée par exemple un modèle de conception et de dimensionnement de moteur électrique, on insiste beaucoup plus sur les variables continues, même si quelques variables discrètes sont présentes, comme le nombre de paires de pôles du moteur. Lors de

l'optimisation qui suit, ce nombre est naturellement pris en considération pour les calculs du modèle, mais n'est généralement pas une variable d'optimisation. Si le concepteur souhaite un moteur bipolaire, il fixera la valeur du paramètre à 1, puis il pourra procéder à d'autres optimisations avec ce paramètre fixé à 2, 3 ou 4. Jamais un concepteur de moteur n'attend que le nombre de paires de pôles soit le résultat d'une quelconque optimisation.

De même, lorsque l'on modélise un problème d'ordonnancement, on prend en compte des variables continues, comme les dates de début ou de fin des tâches par exemple. Cependant, on peut considérer un modèle d'ordonnancement comme essentiellement discret, dans la mesure où les variables utiles à l'établissement d'un ordonnancement sont celles qui donnent l'ordre des tâches.

Dans la littérature scientifique, la problématique de la mixité des modèles est abordée, et elle se fait plus dense lorsqu'il s'agit de dimensionner quelque chose sur la base de ces modèles. Par exemple, un modèle de moteur asynchrone est étudié dans (Le Besnerais *et al.*, 2008), et un algorithme génétique est adapté pour prendre en compte les deux natures de variables. De même, dans (Shi *et al.*, 2020), c'est la déformation du ballast des voies ferrées qui est étudié lors du passage des trains. Un modèle de fiabilité d'un système de commande d'éclairage à base d'interrupteurs électroniques (IGBT) a été développé avec des variables discrètes et continues (Rajaguru *et al.*, 2018). Quatre problèmes de dimensionnement, respectivement d'un réacteur, un réducteur mécanique, un réservoir de pression et le calcul du nombre de circuits intégrés dans un circuit d'électronique numérique ont été reformulés dans un espace de solutions linéarisé avec des variables continues discrètes (An *et al.*, 2018). L'utilisation d'une paramétrisation discrète et continue pour l'optimisation topologique et la conception de pièces en matériaux composites permet de créer des structures plus légères et plus fortes (Luo *et al.*, 2020). Dans le domaine de l'ordonnancement, les deux formulations du temps, discrète et continue, que l'on peut trouver dans les modèles mathématiques ont été comparées sur 16 problèmes tests de type flowshop hybrides avec préemption dans (Castro *et al.*, 2019). Les résultats montrent que la formulation à base de précédences est la plus efficace, battue par une représentation en temps discret lorsque l'on considère des arrêts communs à toutes les machines plutôt que des arrêts spécifiques aux machines. Pour le problème à un seul étage avec machines parallèles, la formulation à temps discret est la meilleure.

Quelques modèles discrets et continus dans le domaine de l'énergie et du transport sont passés en revue dans (Derakhshan *et al.*, 2015). Un modèle discret-continu a aussi été utilisé pour étudier avec précision les différents modes de transports utilisés par les Autrichiens, et dans quelles situations et pourquoi on les choisit (Jokubauskaitė *et al.*, 2019). La discrétisation des données est aussi quelque chose d'utile lorsque l'on essaie d'utiliser des outils comme les réseaux bayésiens (Beuzen *et al.*, 2018). Trois principales méthodes de discrétisation y sont comparées : manuelle, supervisée et non-supervisée. Pour déterminer l'état optimal d'un système de transport de l'énergie électrique, il faut résoudre le problème du flux optimal de puissance et trouver les valeurs nominales des variables d'état qui optimisent les performances du réseau, tout en satisfaisant ses contraintes physiques et ses contraintes de fonctionnement (Soler *et al.*, 2012).

Je propose de développer une méthode d'optimisation pour les **modèles mixtes**, c'est-à-dire capable de s'adapter à la grande majorité des modèles développés par les « nouveaux modélisateurs ». S'il est évident qu'une variable doit varier, on ne fait pas varier une variable discrète de la même manière qu'une variable continue.

Une variable discrète est limitée par la gamme de valeurs qui lui est imposée. Une variable continue évolue dans un espace continu, donc dense et vaste par définition. La question à se poser ici est la précision avec laquelle l'utilisateur souhaite obtenir son résultat. Cette

précision fait appel à deux notions, le *nombre de chiffres significatifs* et l'*étendue* de la gamme.

D'abord, considérons que 1,296 ou 1,3 sont deux nombres que l'on peut tout aussi bien qualifier de différents ou d'égaux. Pour trancher, il faut savoir comment on souhaite utiliser ce résultat par la suite. Cette réponse appartient à l'utilisateur, pas à l'optimisateur. Cependant, l'optimisateur doit avoir connaissance de cette information s'il souhaite fournir une réponse efficace à son client.

Ensuite, pour illustrer la notion d'étendue, considérons qu'une inductance varie généralement entre 1mH et 1H (le Henry est une grosse unité), alors qu'une capacité varie, elle, le plus souvent entre 1nF et 1mF, et quelquefois au-delà en fonction des applications. Il apparaît ici clairement que, lorsque l'on souhaite prendre en considération un problème d'optimisation qui utilisera une inductance et une capacité, ces deux variables continues devront être renseignées différemment si on souhaite les traiter avec équité. En effet, on souhaitera connaître l'inductance avec 3 chiffres significatifs dans une gamme de valeurs de  $10^3$  (de 1mH à 1H), 438mH par exemple, alors que la capacité pourra varier dans une gamme de valeurs de  $10^6$  (de 1nF à 1mF), avec seulement 2 chiffres significatifs, 63μF par exemple.

Sur cet axe de travail concernant l'optimisation sur des modèles mixtes, je souhaite apporter des réponses aux questions suivantes en prenant en compte, simultanément et avec le même niveau d'importance, les variables continues et discrètes des modèles.

- Comment faire de la diversification dans un ensemble de solutions pour modèle mixte ?
- Comment faire de l'intensification dans un ensemble de solutions pour modèle mixte ?
- Le tout pendant un temps fixe ? Pendant un temps adaptable ?
- Adaptable en fonction ... 1) de la difficulté supposée ?  
2) des solutions déjà trouvées jusqu'ici ?

Par la suite, le modèle peut être vu comme une instanciation de ses variables dans l'espace des solutions. L'optimisateur doit alors *utiliser* le temps d'ordinateur de façon *intelligente*. Il doit procéder à la fois à une diversification pour effectuer une recherche globale dans l'espace des solutions, et à une intensification pour effectuer des recherches locales autour de solutions prometteuses. C'est le deuxième axe de travail que je propose pour compléter mes propositions au sujet de la modélisation et de l'optimisation.

### **4.3.2 Environnement d'optimisation auto-adaptatif**

Le second axe sur lequel j'entends concentrer mes efforts dans les années qui viennent concerne l'**optimisation auto-adaptative**. Avant de détailler les axes de réflexion que je souhaite développer, je présente ici quelques pistes d'inspiration issues de la littérature scientifique.

Pour ce qui concerne l'optimisation, les idées qui m'attirent l'attention et dans lesquelles je compte puiser de l'inspiration concernent les hyper-heuristiques, pour lesquelles la référence mondiale sur le sujet me semble être Edmund Burke, de l'Université de Stirling en Ecosse (Burke et *al.*, 2013), (Drake et *al.*, 2019) et (Burke et *al.*, 2010 et 2019). Une hyper-heuristique est capable de s'adapter rapidement au problème posé, et fournit ainsi des solutions de bonne qualité sur un large éventail de problèmes possibles (Pandiri et Singh, 2018). Une hyper-heuristique peut être considérée comme un ensemble de stratégies de haut niveau qui gèrent un ensemble d'heuristiques de bas niveau. Elle travaille, soit en

sélectionnant une heuristique à partir d'une banque d'heuristiques, soit en en générant une nouvelle à partir d'une banque de composants (Miranda et *al.*, 2017). Une hyper-heuristique fonctionne donc dans un espace d'heuristiques, alors qu'une méta-heuristique travaille directement dans un espace de solutions au problème traité. En d'autres termes, une hyper-heuristique essaie de chercher une heuristique bien adaptée pour la résolution d'un problème, alors qu'une méta-heuristique se « contente » de chercher une bonne solution. L'intérêt du développement d'une hyper-heuristique est qu'elle permet de combiner plusieurs heuristiques d'une manière appropriée, en fonction de la stratégie, afin qu'elles fournissent de meilleures solutions ensemble que si elles avaient été appliquées séparément. Cette méthode est appliquée à différents domaines comme l'énergie renouvelable, pour les fermes d'éoliennes (Li et *al.*, 2017), l'optimisation du stockage d'énergie dans les micro-réseaux (Mallol-Poyato et *al.*, 2015), du réseau de distribution d'eau (Kheiri et *al.*, 2015), les emplois du temps dans les universités (Muklason et *al.*, 2019), l'allocation des tâches de maintenance dans les chemins de fer danois (Pour et *al.*, 2018), ou encore le problème de conception des itinéraires de transport urbain (Ahmed et *al.*, 2019). Le problème du voyageur de commerce a également été abordé sous l'angle hyper-heuristique, avec l'utilisation respective de colonies d'abeilles (Pandiri et Singh, 2018) et de colonies de fourmis (Abd Aziz, 2015). Les problèmes d'ordonnancement sont également étudiés : l'ordonnancement de projets multi-compétences sous contraintes de ressources (Lin et *al.*, 2020), avec temps opératoires flous (Alipouri et *al.*, 2019), les problèmes de type flowshop, avec des temps d'opération flous (Lin, 2019), avec plusieurs usines de production et une seule pour l'assemblage (Lin et *al.*, 2017), ou encore sous l'angle de la génération d'algorithmes génétiques efficaces pour ce type de problèmes (Bacha et *al.*, 2019).

Je souhaite développer un environnement dans lequel l'utilisateur pourra décider ce qu'il souhaite faire à plusieurs étapes du processus d'optimisation. Soit il décide de « laisser faire l'outil » et, dans ce cas, je proposerai des pistes de réflexion pour offrir une optimisation au meilleur rapport qualité/prix. Soit, s'il le souhaite, l'utilisateur aura la possibilité de devenir, en plus d'un « nouveau modélisateur », un « nouvel optimisateur ». Il pourra choisir, en fonction de l'évolution de sa solution, la méthode de diversification ou d'intensification qu'il souhaite opérer, ainsi que la solution à partir de laquelle il souhaite partir dans le cas d'une intensification.

Afin de définir les contours de ce projet, on peut se poser la question : Qu'appelle-t-on optimisation ? La réponse que l'on apporte habituellement à cette question est la suivante : « il s'agit de trouver la meilleure solution possible dans le meilleur temps possible ». Il en résulte l'antagonisme suivant qu'il faut résoudre : meilleure solution / meilleur temps. Avant de proposer un compromis entre ces deux exigences, encore faut-il préciser ces deux notions.

Qu'appelle-t-on généralement « meilleure solution » ?

Deux façons de répondre à cette question existent. La première consiste à répondre que la meilleure solution est la solution optimale. On utilise alors une méthode exacte. Mais, même dans ce cas, plusieurs solutions peuvent être équivalentes. On peut considérer que toutes se valent, à défaut de contraintes supplémentaires, et se contenter de la solution donnée par l'ordinateur. Ces solutions sont souvent trop longues à attendre, par rapport au temps dont dispose l'utilisateur final.

Donc, bien souvent, la « meilleure solution » est celle que l'on a été en mesure de trouver, avec la méthode approchée que l'on a choisie. Dans ce cas, de nouvelles questions doivent se poser, du type : Comment la méthode a-t-elle été choisie ? Pourquoi celle-ci et pas une autre ? Parmi combien d'autres ?

Qu'appelle-t-on généralement « meilleur temps » ?

Souvent, dans les travaux, on compare les méthodes d'abord en fonction de l'écart à la meilleure solution connue, et on indique ensuite le temps de calcul qui a été nécessaire à l'exécution des différentes méthodes. Cette pratique démontre que, dans la plupart des publications, dont les nôtres jusqu'à présent, le temps est une variable secondaire dans l'optimisation. Or, le temps absolu de résolution de la méthode qui donne le meilleur résultat est-il bien le « meilleur temps » ? Ou bien est-ce le temps absolu de la méthode la plus rapide ?

Sur cet axe de travail, je souhaite développer un environnement d'optimisation auto-adaptatif, en essayant d'utiliser la définition de l'optimisation pour apporter une réponse « raisonnable » à l'antagonisme « meilleure solution » / « meilleur temps » avec les propositions suivantes :

- Ne pas forcément choisir une méthode d'optimisation, mais évaluer toutes celles dont on dispose en fonction du critère "amélioration de la solution/temps passé", ou encore laisser le choix à l'utilisateur.
- Mesurer les temps, et rapporter le temps passé à l'amélioration de la solution. De cette façon, j'espère arriver à fournir un environnement d'optimisation dans lequel le temps passé dans chaque méthode est un temps « utile ». On voit souvent des graphiques qui montrent l'évolution de la valeur de la fonction objectif en fonction du nombre d'itérations. Les queues de ces graphiques montrent du temps de calcul gaspillé.

A partir des données temporelles récoltées en fonction des méthodes, il sera possible de déterminer des stratégies d'optimisation qui s'adaptent à l'espace de solution, c'est ce que j'appelle une *stratégie d'optimisation auto-adaptative*.

A la fin de chaque travail d'optimisation, un compte-rendu sera affiché :

- Sur la solution : Quelles solutions obtenues, avec quelles méthodes.
- Sur le temps : Combien de temps passé, temps global passé en diversification, en intensification, avec quelles méthodes.

A partir de ce compte-rendu, l'utilisateur pourra choisir de passer plus de temps sur l'amélioration d'une solution particulière (intensification), ou relancer une méthode de diversification avec quelques individus solutions qui lui semblent intéressantes. Il pourra par exemple choisir la méthode dont le ratio "temps/amélioration opérée" est le plus favorable.

Le premier problème qui se posera ensuite, à partir du moment où l'on souhaite mesurer une amélioration, est celui de la référence. **L'amélioration dépend de la référence.**

Si la référence est mauvaise, il est plus facile d'obtenir une bonne amélioration qu'avec une meilleure référence. Il est préférable de choisir une bonne référence, mais comment peut-on qualifier une référence de « bonne », surtout sur un problème dont on ignore « tout », si l'on se place du point de vue de la méthode d'optimisation ?

Pour les problèmes sur lesquels de l'expérience a été accumulée, une bonne référence peut être le résultat d'une heuristique. Par exemple, on peut dire que le résultat obtenu avec NEH sur un problème d'ordonnement de type flow shop est une bonne référence. Si l'on aborde un problème de type nouveau, on ignore ce qu'est une bonne référence.

A quoi pourra ressembler cet environnement d'optimisation que j'envisage de développer ?

Sur un problème totalement nouveau, pour lequel nous n'avons aucune référence, seulement une fonction d'évaluation, on lance  $n$  calculs. Sur cet échantillon, les  $n$  valeurs de la fonction objectif obtenues nous fournissent une valeur moyenne et un écart-type. Si on s'intéresse à un problème de minimisation, on pourra prendre comme valeur de référence  $m-2\sigma$  par exemple, et retenir quelques unes des meilleures solutions de l'échantillon comme meilleures solutions intermédiaires.

Ensuite, on pourra procéder à la diversification, en lançant les méthodes d'optimisation globales telles qu'un algorithme génétique, un recuit simulé et/ou une colonie de fourmis. Ces méthodes seront comparées en fonction du ratio temps passé/amélioration. Au passage, nous pouvons noter que nous aurons, à chaque résolution de problème, une comparaison des méthodes.

Puis, nous procéderons à la phase d'intensification, en lançant les méthodes de recherches locales. Les questions qui se posent à ce stade sont nombreuses : Quelles méthodes ? Sur quelles solutions intermédiaires ? Ne vaudrait-il pas mieux continuer encore la diversification ?

Puis, quand on va réussir à améliorer la meilleure solution connue : On arrête ? On continue ? Jusqu'où aller ? De combien de temps dispose-t-on pour pouvoir améliorer encore la solution ?

Nous pourrions proposer un mode automatique, pour lequel nous aurons préalablement défini la stratégie d'optimisation, et un mode manuel piloté à chaque étape par l'utilisateur. A chaque fois qu'il reprendra la main, il pourra aussi décider de bloquer telle ou telle valeur là où elle en est dans le processus d'optimisation et donc choisir qu'elle n'est plus une variable.

#### **4.4 Modélisation et optimisation pour les problèmes d'ordonnement**

Pour ce qui concerne l'ordonnement, les perspectives de recherche que je propose suivent deux axes principaux. Le premier axe vise la poursuite de mes activités de recherche sur ces problèmes. Le second propose le développement des méthodes de ré-ordonnement.

##### **4.4.1 Problèmes d'ordonnement**

Depuis 2008, je travaille au développement de modèles mathématiques, de méthodes exactes et approchées pour la résolution des problèmes d'ordonnement de type flowshop et jobshop, classiques et hybrides. Nous avons ajouté, au cours de la dernière décennie, la prise en compte des contraintes de blocage mixtes à ces problèmes. Nous avons commencé en 2017 à considérer le cas des machines parallèles non identiques sur les problèmes de type flowshop hybrides (Pacheco et *al.*, 2017).

Bien que les problèmes d'ordonnement soient l'objet de recherches ininterrompues depuis les années 1950, leur actualité est toujours foisonnante, et des choses passées inaperçues jusqu'à nos jours sont encore découvertes, comme de nouvelles caractéristiques des solutions optimales pour le problème  $F2||C_{max}$  (Rabadi et *al.*, 2019). Les chercheurs continuent de

développer des modèles (Ünal et al., 2019) et des méthodes approchées, pour les problèmes de type flowshop classiques (Fernandez-Viagas et al., 2017) et hybrides (Fernandez-Viagas et al., 2018). Pour les flowshop avec assemblage, deux revues de littérature ont été publiées concomitamment. Dans (Komaki et al., 2019), on trouve treize pistes de recherche pas du tout ou insuffisamment explorées, alors que dans (Framinan et al., 2019), les différents types de problèmes sont bien catégorisés. Des heuristiques efficaces sont proposées dans (Framinan et Perez-Gonzalez, 2017).

Pour les jobshops, la littérature scientifique semble s'étioler (Chaudhry et Khan, 2016). Néanmoins, une revue de littérature discute des nouvelles perspectives de recherche autour de ce problème dans l'environnement Industrie 4.0 (Zhang et al., 2019).

Pour les jobshops hybrides, un modèle mathématique qui sélectionne la machine, ordonnance les tâches, et prend les décisions de mise sous et hors tension des machines (Zhang et al., 2017), et deux revues de littérature sont proposées. L'une se concentre sur le problème d'ordonnancement en lui-même (Xie et al., 2019), alors que l'autre s'intéresse plus à l'utilisation des algorithmes évolutionnaires ainsi que ceux à base d'essaims (Gao et al., 2019).

Nous travaillerons au développement de bornes inférieures pour les problèmes de type uniforme et quelconque, que nous intégrerons à la méthode de séparation et évaluation, afin de pouvoir trouver des solutions optimales pour des problèmes de tailles plus grandes. Nous serons ainsi en mesure d'évaluer plus efficacement la qualité de nos bornes inférieures et de nos méthodes approchées.

Pour ce qui concerne les heuristiques, nous adapterons au cas quelconque les heuristiques déjà développées pour le cas uniforme, et nous nous attacherons également au développement de nouvelles. En particulier, pour ce qui concerne le problème quelconque, nous envisageons de tirer profit de la non-uniformité du problème. Comme les machines seront plus rapides pour certains jobs que pour d'autres, nous essaierons de privilégier ces associations. Nous développerons aussi une fonction d'évaluation adaptée à ce problème, afin d'utiliser la puissance des méta-heuristiques que nous avons développées au laboratoire.

Parallèlement à ce travail que nous avons déjà entamé sur les problèmes de type flowshop hybride, nous nous attaquerons également aux problèmes de type jobshop hybride, avec machines parallèles non identiques. Ce terrain de recherche est vierge pour le moment, à notre connaissance. Sur l'ensemble des problèmes d'ordonnancement avec machines parallèles non-identiques, nous nous intéresserons particulièrement aux cas des blocages mixtes.

#### **4.4.2 Ré-ordonnancement**

Le second axe de travail sur lequel j'envisage de poursuivre mes efforts concerne le ré-ordonnancement. En effet, l'environnement économique demande à ses acteurs chaque jour plus d'agilité, afin de s'adapter à différentes perturbations, plus ou moins prévisibles. En termes d'ordonnancement, cette demande se traduit par des besoins en ré-ordonnancement. Le ré-ordonnancement permet la prise en compte des incertitudes.

La littérature scientifique propose déjà plusieurs travaux sur le ré-ordonnancement qui s'intéressent majoritairement aux domaines de l'environnement, des transports et de l'organisation des équipes dans les hôpitaux. Une étude s'intéresse à l'optimisation à court-terme des opérations de commande de systèmes hydro-électriques en cascade (Mathur et al., 2020). Le ré-ordonnancement permet ici la prise en compte des incertitudes relatives à la nature volatile et imprévisible des conditions météorologiques et du marché. L'optimisation intégrée de la gestion des perturbations et de l'ordonnancement pour réduire les émissions de

carbone est réalisée grâce à un modèle d'optimisation multi-objectif et une stratégie de rééchelonnement dans (Ning et *al.*, 2020). La récupération de produits périssables est également étudiée, pour la prise en compte des incertitudes (Drenovac et *al.*, 2020).

Le domaine des transports est un domaine d'application pour lequel le ré-ordonnancement est utile, pour le domaine ferroviaire (Wen et *al.*, 2019), (Heil et *al.*, 2020) et celui du transport aérien (Chen et *al.*, 2020). Dans les hôpitaux, on l'utilise pour le ré-ordonnancement des tâches des médecins (Gross et *al.*, 2018), ou celui des services de soins aux patients (Hooshangi-Tabrizi et *al.*, 2020).

L'un des piliers de l'Industrie 4.0 est l'application de systèmes de production cyberphysiques qui intègrent des outils informatiques sophistiqués. Cela implique l'intégration d'ordinateurs, permettant une connexion en temps réel entre les postes de travail et les systèmes de soutien à la décision (Rossit et *al.*, 2019). Une autre application est le ré-ordonnancement des missiles de défense sur les bateaux de guerre lors des phases d'attaques. Un travail récent s'est intéressé au double objectif de la maximisation de la probabilité d'atteinte des cibles et la minimisation des différences avec l'ordonnancement initial (Silav et *al.*, 2018).

Une récente revue de littérature s'intéresse aux flowshops hybrides (He et *al.*, 2020) et une autre s'intéresse aux opportunités d'intégration au milieu industriel ainsi qu'aux applications (Uhlmann et Frazzon, 2018). Le problème de type jobshop hybride a également été abordé sous l'angle de l'optimisation multi-objectif (Bissoli et *al.*, 2019).

Du côté des méthodes, deux stratégies de ré-ordonnancement sont présentées dans (Tian et *al.*, 2019), la stratégie à horizon flottant et la stratégie d'ordonnancement dynamique. Cette dernière peut être guidée par les événements ou périodique. Lorsqu'elle est guidée par les événements, chaque événement imprévu déclenche une procédure de ré-ordonnancement, alors que lorsqu'elle est périodique, la procédure de ré-ordonnancement est déclenchée à intervalles de temps réguliers, indépendamment du nombre d'événements apparus au cours de la période.

La méthode d'ordonnancement et de ré-ordonnancement « verte » permet d'économiser l'énergie dans les systèmes de production et de logistique (Nouri et *al.*, 2019). Elle est composée d'une première phase au cours de laquelle un ordonnancement prédictif hors perturbation optimise une fonction objective. Au cours de la deuxième phase, un ré-ordonnancement est effectué en cas de perturbation, c'est la partie réactive.

Sur la thématique du ré-ordonnancement, nous avons déjà proposé des stratégies d'aide à la décision pour l'intégration des opérations urgentes à un programme opératoire existant (Bouguerra et *al.*, 2016). Par ailleurs, dans la continuité du travail déjà commencé sur les machines uniques et les machines parallèles, nous travaillons actuellement sur le ré-ordonnancement de flowshops, pour l'instant sans contraintes de blocage.

Nous envisageons de poursuivre nos efforts de recherche sur le ré-ordonnancement de flowshops, avec la prise en compte d'ajout comme de retrait de commandes, d'importances pondérées, en y ajoutant les contraintes de blocage mixtes. Nous envisageons également de travailler sur les ré-ordonnements de jobshops, avec la prise en compte des mêmes types de contraintes et hypothèses.

Nous travaillerons ensuite sur les problèmes hybrides, avec la prise en compte progressive des contraintes de blocages mixtes. Après avoir accumulé de l'expérience dans le domaine des systèmes de production avec machines parallèles non identiques, nous pourrions également nous intéresser au ré-ordonnancement de ces systèmes de production.

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, j'ai présenté quelques perspectives de recherche vers lesquelles j'envisage de poursuivre mes efforts dans les années qui viennent.

D'abord, dans la mesure où j'ai déjà commencé à travailler sur des modèles de financement des systèmes de production, je vais continuer dans cette voie. Dans un premier temps, mes travaux s'orienteront vers l'amélioration des modèles afin de prendre en compte plus de variables utiles à la décision. Ensuite, leur couplage avec des méthodes d'optimisation devra permettre d'ajuster au mieux les investissements en fonction des bénéfices souhaités.

Le projet principal que j'envisage de développer est un environnement d'optimisation auto-adaptatif pour des modèles mixtes qui prenne en compte, au même niveau d'importance, les variables continues et les variables discrètes. Dans cet environnement, je souhaite développer des stratégies d'optimisation qui utilisent l'ordinateur avec le meilleur rapport efficacité (ou amélioration des solutions) / temps de calcul (temps de recherche). L'objectif visé est de faire de l'optimisation avec le meilleur rapport qualité/prix.

Naturellement, les modèles et les méthodes d'optimisation, qui ont occupé une grande partie de mes recherches jusqu'à aujourd'hui continueront de m'occuper pour une large part. Je poursuivrai mes activités sur les problèmes d'ordonnancement avec contraintes de blocages mixtes, avec d'une part la prise en compte de machines parallèles non-identiques, et d'autre part le ré-ordonnancement. Par ailleurs, j'envisage également de poursuivre mes deux principales collaborations en cours, avec l'équipe voisine du laboratoire sur les problèmes d'optimisation des performances pour le développement durable, ainsi qu'avec mes collègues allemande et portugaise pour la modélisation et l'optimisation des problèmes de localisation.

Tous les travaux que je propose de développer doivent permettre d'attirer toujours plus de décideurs du monde industriel vers mon laboratoire, afin de fluidifier les contacts entre nos deux mondes. C'est toujours en ayant cet objectif de finalité de mes recherches que je travaille, et c'est également dans cet esprit que je propose des outils pédagogiques, utiles et directement utilisables.

## Chapitre 5 : Conclusion et Perspectives

Mes dix premières années de recherche, dans le domaine du génie électrique, m'ont vu développer plusieurs modèles analytiques multi-physiques de systèmes électromécaniques. J'ai aussi contribué au développement d'une méthodologie d'optimisation de type gradient, par la définition de boîtes de calcul permettant d'intégrer à cette méthodologie des parties de modèle non analytiques. Ces activités m'ont permis d'obtenir un certain recul face aux activités de modélisation et d'optimisation, mais surtout une bonne expérience dans le domaine de la conception. Ainsi, même si j'ai effectué une conversion thématique au 1<sup>er</sup> janvier 2008, j'ai gardé de ces premières années des qualités qui m'ont servi pour les travaux présentés dans ce rapport, ainsi qu'une tendresse pour le génie électrique, que je continue d'enseigner à l'IUT avec le plaisir relatif aux souvenirs de jeunesse.

Depuis 2008, les problèmes que j'ai abordés sont plutôt discrets, mais les problématiques liées à la conception d'un modèle en vue de son optimisation demeurent voisines. J'ai pu développer des modèles mathématiques, des bornes inférieures ainsi que des méthodes de résolution exactes ou approchées pour la résolution de problèmes d'ordonnancement variés. Nous avons principalement travaillé sur les contraintes de blocage mixtes, associées aux problèmes de type flow shop et job shop, classiques et hybrides. Le développement de toutes ces méthodes de résolution a été réalisé au sein de classes cohérentes, qui permettent à une méthode, initialement développée pour un problème, d'être réutilisée pour la résolution d'un autre, sans travail supplémentaire. Ce travail de programmation orientée objet permet surtout de s'affranchir progressivement, au fil du temps, des erreurs consubstantielles au développement d'un programme.

L'ensemble de ces travaux a été pensé comme la fabrication d'un porte-avions. Je me suis en effet appliqué à préparer toutes les armes qu'il nous faut pour être en mesure de répondre favorablement à toute demande d'ordonnancement. Bien sûr, dans la mesure du possible, il est utile d'avoir des armes dont on connaît les limites, et sur lesquelles on s'entraîne, de sorte à ce que le jour où on a besoin de s'en servir, l'objectif soit atteint. Là encore, notre volonté de développer nos outils sous la forme d'un environnement orienté objet, depuis le début de cette activité de recherche, trouve sa pleine justification. La fiabilité de nos outils s'affine ainsi au fil des mois et des travaux réalisés dans cet environnement. Au passage, nos efforts de recherche de nouvelles méthodes heuristiques ne sont pas seulement un enjeu purement intellectuel, mais aussi un enjeu scientifique, dans la mesure où elles peuvent, par elles seules mais aussi grâce aux améliorations locales qui en découlent souvent, contribuer significativement à l'amélioration des résultats obtenus par différentes méthodes méta-heuristiques.

Pour filer la métaphore du porte-avions, nous pouvons conclure que nous l'avons construit dans le but de nous attaquer à trois grands types de problèmes : ceux qui concernent l'ordonnancement de flow shop ou job shop, classiques ou hybrides avec contraintes de blocages mixtes, les problèmes de modélisation analytique continue et/ou discrète, ainsi que les problèmes d'optimisation qui s'y rapportent. Nous avons déjà effectué quelques essais en mer, en allant au-delà de l'équipe dans un premier temps, pour tester la tenue des équipements d'optimisation. Ces premiers tests ayant donné de bons résultats, nous sommes allés plus loin, pour tester les capacités de modélisation sur des problèmes inconnus. Nous pouvons donc conclure qu'aujourd'hui, après ces phases de tests concluantes, le bateau semble bien tenir la mer. Nous décrivons, dans le paragraphe suivant, quelques horizons vers lesquels nous pourrions nous diriger, avec ce navire, dans les années qui viennent.

Bien que les statistiques inférentielles fournissent des résultats étonnants et progressent, elles aussi, un scientifique n'a pas pour vocation première de prédire l'avenir, surtout si on lui demande de le faire avec précision.

Quand doit-on arrêter une méta-heuristique ? Qu'est-ce-que du temps d'ordinateur bien utilisé ? Quand on a déjà utilisé une ou plusieurs méta-heuristiques, ainsi qu'une ou plusieurs améliorations locales, que faire de plus ? Comment faire mieux ? C'est sur ces questions que je souhaite développer mes projets à l'avenir. Cela tient en une phrase : développer des stratégies d'optimisation sur des modèles mixtes qui utilisent l'ordinateur avec le meilleur rapport efficacité (ou amélioration des solutions) / temps de calcul (temps de recherche). Il s'agit, si l'on souhaite résumer le projet en une phrase, de faire de l'optimisation avec le meilleur rapport qualité/prix.

## Références

- Abd Aziz, Z. (2015). Ant colony hyper-heuristics for travelling salesman problem. *Procedia Computer Science*, 76, 534-538.
- Abele, E., Liebeck, T., Wörn, A. (2006). *Measuring Flexibility in Investment Decisions for Manufacturing Systems*, Institute of Production Management, Technology and Machine Tools, Darmstadt University of Technology, Darmstadt, Germany.
- Adams, J., Balas, E., Zawack, D. (1988). The shifting bottleneck procedure for job shop scheduling. *Management science*, 34(3), 391-401.
- Aguiar, L., Gagnepain, P. (2017). European cooperative R&D and firm performance: Evidence based on funding differences in key actions. *International Journal of Industrial Organization*, 53, 1-31.
- Ahmed, L., Mumford, C., Kheiri, A. (2019). Solving urban transit route design problem using selection hyper-heuristics. *European Journal of Operational Research*, 274(2), 545-559.
- Akkan, C., Karabatı, S. (2004). The two-machine flowshop total completion time problem: Improved lower bounds and a branch-and-bound algorithm. *European Journal of Operational Research*, 159(2), 420-429.
- Alfaro-Fernández, P., Ruiz, R., Pagnozzi, F., Stützle, T. (2020). Automatic Algorithm Design for Hybrid Flowshop Scheduling Problems. *European Journal of Operational Research*, 282(3), 835-845.
- Alipouri, Y., Sebt, M.H., Ardeshir, A., Chan, W.T. (2019). Solving the FS-RCPSP with hyper-heuristics: A policy-driven approach. *Journal of the Operational Research Society*, 70(3), 403-419.
- Allahverdi, A., Aydilek, H., Aydilek, A. (2020). No-wait flowshop scheduling problem with separate setup times to minimize total tardiness subject to makespan. *Applied Mathematics and Computation*, 365, 124688.
- Amar, A.D., Xiao, B. (1997). Scheduling on a bottleneck station: A comprehensive cost model and heuristic algorithms. *International Journal of Production Research*, 35(4), 1011-1030.
- An, Q., Fang, S.C., Li, H.L., Nie, T. (2018). Enhanced linear reformulation for engineering optimization models with discrete and bounded continuous variables. *Applied Mathematical Modelling*, 58, 140-157.
- Applegate, D., Cook, W. (1991). A Computational Study of the Job-Shop Scheduling Problem. *ORSA Journal on Computing*, 3(2), 149-156.
- Artigues, C., Gendreau, M., Rousseau, L.M., Vergnaud, A. (2009). Solving an integrated employee timetabling and job-shop scheduling problem via hybrid branch-and-bound. *Computers & Operations Research*, 36(8), 2330-2340.
- Bacha, S.Z.A., Belahdji, M.W., Benatchba, K., Tayeb, F.B.S. (2019). A New Hyper-Heuristic to Generate Effective Instance GA for the Permutation Flow Shop Problem. *Procedia Computer Science*, 159, 1365-1374.

- Bagchi, T.P., Gupta, J.N.D., C. Sriskandarajah, C. (2006). A review of TSP based approaches for flowshop scheduling. *European Journal of Operational Research*, vol. 169, 816-854.
- Baker, L. (2015). The evolving role of finance in South Africa's renewable energy sector. *Geoforum*, 64, 146-156.
- Banaszak, Z.A., Krogh, B.H. (1990). Deadlock avoidance in flexible manufacturing systems with concurrently competing process flows. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 6(6), 724-734.
- Baptiste, P., Hguny, L.K. (1997). A Branch and Bound Algorithm for the F/no-idle/ $C_{max}$ . *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Production Management (IEPM'97)*, Vol. 1, 429-438.
- Ben Hmida, A., Haouari, M., Huguet, M.J., Lopez, P. (2010). Discrepancy search for the flexible job shop scheduling problem. *Computers and Operations Research*, 37(12), 2192-2201.
- Beuzen, T., Marshall, L., Splinter, K.D. (2018). A comparison of methods for discretizing continuous variables in Bayesian Networks. *Environmental modelling & software*, 108, 61-66.
- Bierwirth, C. (1995). A generalized permutation approach to jobshop scheduling with genetic algorithms. *OR Spektrum* 17, 87-92.
- Birbil, S.I., Fang, S.C. (2003). An electromagnetism-like mechanism for global optimization. *Journal of Global Optimization*, vol. 25, 263-282.
- Bissoli, D.C., Zufferey, N., Amaral, A.R. (2019). Lexicographic optimization-based clustering search metaheuristic for the multiobjective flexible job shop scheduling problem. *International Transactions in Operational Research*.
- Bouguerra, A. (2017). *Optimisation et aide à la décision pour la programmation des opérations électives et urgentes*, Thèse de doctorat, Université de Lorraine, Metz, France.
- Bouguerra, A., Sauvey, C., Sauer, N. (2015). Mathematical model for maximizing operating rooms utilization. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 118-123. (INCOM'2015)
- Bouguerra, A., Sauvey, C., Sauer, N. (2016, April). Online assignment strategies for emergent, urgent and work-in-cases surgeries in an operating theatre. In *2016 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CODIT)* (438-443). IEEE.
- Bouguerra, A., Sauvey, C., Sauer, N. (2020). A decision support tool for the urgent surgeries assignment problem. *Journal of Engineering Research*, 8(2), 227-250.
- Boumediène-Merouane, H., Derbala, A. (2006). Les Problèmes d'Ordonnancement à Machines Parallèles de Tâches Dépendantes: une Evaluation de Six Listes et d'un Algorithme Génétique. *COSI*, 6, 279-289.
- Brah, S.A., Hunsucker, J.L. (1987, May). Optimal scheduling in a flow shop with multiple processors. In *TIMS/ORSA Joint National Meeting in New Orleans, Louisiana* (4-6).
- Brucker, P. (1988). An efficient algorithm for the job-shop problem with two jobs. *Computing*, 40(4), 353-359.

- Brucker, P., Jurisch, B. (1993). A new lower bound for the job-shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 64(2), 156-167.
- Burke, E.K., Gendreau, M., Hyde, M., Kendall, G., Ochoa, G., Özcan, E., Qu, R. (2013). Hyper-heuristics: A survey of the state of the art. *Journal of the Operational Research Society*, 64(12), 1695-1724.
- Burke, E.K., Hyde, M., Kendall, G., Ochoa, G., Özcan, E., Woodward, J.R. (2010). A classification of hyper-heuristic approaches. In *Handbook of metaheuristics* (pp. 449-468), Springer.
- Burke, E.K., Hyde, M.R., Kendall, G., Ochoa, G., Özcan, E., Woodward, J.R. (2019). A classification of hyper-heuristic approaches: revisited. In *Handbook of Metaheuristics* (pp. 453-477), Springer, Cham.
- Byrne, R.H., Nguyen, T.A., Copp, D.A., Chalamala, B.R., Gyuk, I. (2017). Energy management and optimization methods for grid energy storage systems. *IEEE Access*, 6, 13231-13260.
- Carlier, J., Pinson, E. (1989). An algorithm for solving the jobshop problem. *Management Science*, 35(2), 164-176.
- Carlier, J., Pinson, E. (1994). Adjustment of heads and tails for the job-shop problem. *European Journal of Operational Research*, 78(2), 146-161.
- Carlier, J., Rebaï, I. (1996). Two branch and bound algorithms for the permutation flow. *European Journal of Operational Research*, vol. 90, 238-251.
- Castro, P.M., Harjunoski, I., Grossmann, I.E. (2019). Discrete and continuous-time formulations for dealing with break periods: Preemptive and non-preemptive scheduling. *European Journal of Operational Research*, 278(2), 563-577.
- Castro, P.M., Harjunoski, I., Grossmann, I.E. (2019). Discrete and continuous-time formulations for dealing with break periods: Preemptive and non-preemptive scheduling. *European Journal of Operational Research*, 278(2), 563-577.
- Chaabane, S. (2004). *Gestion prédictive des blocs opératoires*. Thèse de Doctorat, INSA de Lyon.
- Chaabane, S., Guinet, A., Smolski, N., Guiraud, M., Luquet, B., Marcon, E., Viale, J.P. (2003). La gestion industrielle et la gestion des blocs opératoires. *Annales Françaises d'Anesthésie et de Réanimation*, 22(10), 904-908.
- Chaudhry, I.A., Khan, A.A. (2016). A research survey: review of flexible job shop scheduling techniques. *International Transactions in Operational Research*, 23(3), 551-591.
- Chen, C.H., Chou, F.I., Chou, J.H. (2020). Multiobjective Evolutionary Scheduling and Rescheduling of Integrated Aircraft Routing and Crew Pairing Problems. *IEEE Access*, 8, 35018-35030. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2974245.
- Cho, Y., Sahni, S. (1981). Preemptive Scheduling of Independent Jobs with Release and Due Times on Open, Flow and Job Shops. *Operations Research*, vol. 29, 511-522.
- Correia, I., Melo, T. (2016). Multi-period capacitated facility location under delayed demand satisfaction. *European Journal of Operational Research*, 255(3), 729-746.

- Correia, I., Melo, T., Sauvey, C. (2019, June). Two-phase heuristics for a multi-period facility location problem with delayed demand satisfaction. 25<sup>ème</sup> EWGLA Conference.
- Daneshamoz, F., Behnamian, J. (2018). A lower bound for job shop scheduling problem with a parallel assembly stage by graph coloring approach. *Journal of Industrial Engineering* 52(3), 367-378.
- Dauzère-Pérès, S., Paulli, J. (1997). An integrated approach for modeling and solving the general multiprocessor job-shop scheduling problem using tabu search. *Annals of Operations Research*, 70, 281-306.
- Dauzère-Pérès, S., Pavageau, C., Sauer, N. (2000). Modélisation et résolution par PLNE d'un problème réel d'ordonnancement avec contraintes de blocage, *ROADEF*, 216-217, Nantes, France.
- Derakhshan, A., Khademi, A., Khademi, S., Yusof, N.M., Lee, M.H. (2015). Review of discrete-continuous models in energy and transportation. *Procedia CIRP*, 26, 281-286.
- Dieter, D., De Reyck, B., Leus, R., Vanhoucke, M. (2006). A hybrid scatter search / electro-magnetism meta-heuristic for project scheduling, *EJOR*, 169, 638-653.
- Drake, J.H., Kheiri, A., Özcan, E., Burke, E.K. (2019). Recent advances in selection hyper-heuristics. *European Journal of Operational Research*, 285(2), 405-428.
- Drenovac, D., Vidović, M., Bjelić, N. (2020). Optimization and Simulation Approach to Optimal Scheduling of Deteriorating Goods Collection Vehicles Respecting Stochastic Service and Transport Times. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 102097.
- Fakhrzad, M.B., Heydari, M. (2008). A heuristic algorithm for hybrid flow-shop production scheduling to minimize the sum of the earliness and tardiness costs. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 25(2), 105-115.
- Fan, H.L., Huang, M.H., Chen, D.Z. (2019). Do funding sources matter? The impact of university-industry collaboration funding sources on innovation performance of universities. *Technology Analysis & Strategic Management*, 31(11), 1368-1380.
- Fattahi, P., Hosseini, S.M.H., Jolai, F., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2014). A branch and bound algorithm for hybrid flow shop scheduling problem with setup time and assembly operations. *Applied Mathematical Modelling*, 38(1), 119-134.
- Fei, H., Meskens, N., Chu, C. (2006, October). An operating theatre planning and scheduling problem in the case of a "block scheduling" strategy. In *2006 International Conference on Service Systems and Service Management (Vol. 1, 422-428)*. IEEE.
- Feng, J., Chu, C., Che, A. (2018). Cyclic jobshop hoist scheduling with multi-capacity reentrant tanks and time-window constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 120, 382-391.
- Fernandez-Viagas, V., Molina-Pariante, J.M., Framinan, J.M. (2018). New efficient constructive heuristics for the hybrid flowshop to minimise makespan: A computational evaluation of heuristics. *Expert Systems with Applications*, 114, 345-356.
- Fernandez-Viagas, V., Ruiz, R., Framinan, J.M. (2017). A new vision of approximate methods for the permutation flowshop to minimise makespan: State-of-the-art and computational evaluation. *European Journal of Operational Research*, 257(3), 707-721.

- Figielska, E. (2014). A heuristic for scheduling in a two-stage hybrid flowshop with renewable resources shared among the stages. *European Journal of Operational Research*, 236(2), 433-444.
- Framinan, J.M., Perez-Gonzalez, P. (2017). The 2-stage assembly flowshop scheduling problem with total completion time: Efficient constructive heuristic and metaheuristic. *Computers & Operations Research*, 88, 237-246.
- Framinan, J.M., Perez-Gonzalez, P., Fernandez-Viagas, V. (2019). Deterministic assembly scheduling problems: A review and classification of concurrent-type scheduling models and solution procedures. *European Journal of Operational Research*, 273(2), 401-417.
- Gao, J., Sun, L., Gen, M. (2008). A hybrid genetic and variable neighborhood descent algorithm for flexible job shop scheduling problems. *Computers and Operations Research*, 35(9), 2892-2907.
- Gao, K., Cao, Z., Zhang, L., Chen, Z., Han, Y., Pan, Q. (2019). A review on swarm intelligence and evolutionary algorithms for solving flexible job shop scheduling problems. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 6(4), 904-916.
- Garey, M.R., Johnson, D.S., Sethi, R. (1976). The complexity of job-shop and flow-shop scheduling. *Mathematics of Operations Research*, vol. 1.
- Gerchak, Y., Gupta, D., Henig, M. (1996). Reservation planning for elective surgery under uncertain demand for emergency surgery. *Management Science*, 42(3), 321-334.
- Gohareh, M.M., Gharneh, N.S., Fatemi Ghomi, S.M.T. (2014). Cash management in single and parallel machine scheduling, *International Journal of Production Research*, 52(9), 2550-2564.
- Goldratt, E. (1993). *Le but, un processus de progrès permanent*. Editions Afnor, 2006 (3ème édition), ISBN 2-12-465641-4.
- Gomes, M.C., Barbosa-Povoa, A.P., Novais, A.Q. (2005). Optimal scheduling for flexible job shop operation. *International Journal of Production Research*, 43(11), 2323-2353.
- Gonzalez, T., Sahni, S. (1978). Flow-shop and job-shop scheduling: Complexity and approximation. *Operations Research*, vol. 26, 36-52.
- Gorine, A. (2011). *Ordonnancement de systèmes flexibles avec contraintes de blocage*. Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine de Metz, France.
- Gorine, A., Sauvey, C., Sauer, N. (2012). Mathematical model and lower bounds for multi stage jobshop scheduling problem with special blocking constraint. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(6), 98-104.
- Graham, R.L., Lawler, E.L., Lenstra, J.K., Rinnoy Kan, A.H.G. (1979). Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling theory: A survey. *Annals of Discrete Mathematics* 5, 287-326.
- Gross, C.N., Fügener, A., Brunner, J.O. (2018). Online rescheduling of physicians in hospitals. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 30(1-2), 296-328.
- Gupta, J.N.D. (1988). Two-stage hybrid flowshop scheduling problem. *Journal of Operational Research Society*, vol. 39(4), 359-364.

- Hahn, D., Minola, T., Vismara, S., De Stasio, V. (2019). Financing Innovation: Challenges, Opportunities, and Trends. *Foundations and Trends in Entrepreneurship*, 15(3-4), 328-367.
- Hall, N.G., Sriskandarajah, C. (1996). A survey of machine scheduling problems with blocking and no-wait in process. *Operations Research*, vol. 44, 510-525.
- Haouari, M., Gharbi, A. (2004). Lower bounds for scheduling on identical parallel machines with heads and tails. *Annals of Operations Research*, 129(1-4), 187-204.
- Haouari, M., Hidri, L. (2008). On the hybrid flowshop scheduling problem. *International Journal of Production Economics*, 113(1), 495-497.
- Haouari, M., Hidri, L., Gharbi, A. (2006). Optimal Scheduling of a two stage hybrid Flow-Shop. *Mathematical Methods of Operations Research*, vol. 64, 107-124.
- Hatzikonstantis, L., Besant, C.B. (1992). Job-Shop Scheduling Using Certain Heuristic Search Algorithms. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 7, 251-261.
- He, X., Dong, S., Zhao, N. (2020). Research on rush order insertion rescheduling problem under hybrid flow shop based on NSGA-III. *International Journal of Production Research*, 58(4), 1161-1177.
- Heil, J., Hoffmann, K., Buscher, U. (2020). Railway crew scheduling: Models, methods and applications. *European Journal of Operational Research*, 283(2), 405-425.
- Henson, K.L. (2019). Student projects as a funding source. *Journal of Information Systems Education*, 21(3), 3.
- Hidri, L., Haouari, M. (2011). Bounding strategies for the hybrid flow shop scheduling problem. *Applied Mathematics and Computation*, 217(21), 8248-8263.
- Hoogeveen, J.A., Lenstra, J.K., Veltman, B. (1996). Preemptive scheduling in a two-stage multiprocessor flow shop is NP-hard. *European Journal of Operational Research*, vol. 89, 172-175.
- Hoogeveen, J.A., Oosterhout, H., van de Velde, S.L. (1994). New lower and upper bounds for scheduling around a small common due date. *Operations Research*, 42(1), 102-110.
- Hooshangi-Tabrizi, P., Contreras, I., Bhuiyan, N., Batist, G. (2020). Improving patient-care services at an oncology clinic using a flexible and adaptive scheduling procedure. *Expert Systems with Applications*, 150, 113267.
- Huang, R.H., Yang, C.L. (2008). Ant colony system for job shop scheduling with time windows. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 39(1-2), 151-157.
- Hunsucker, J.L., Shah, J.R. (1994). Comparative performance analysis of priority rules in a constrained flow shop with multiple processors environment. *European Journal of Operational Research*, vol. 72, 102-114.
- Jackson, J.R. (1956). An extension of Johnson's results on job lot scheduling. *Naval Research Logistic Quarterly* 3, 201-203.
- Jain, A.S., Meeran, S. (1999). Deterministic job-shop scheduling: Past, present and future. *European Journal of Operational Research*, 113(2), 390-434.

- Jansen, K., Mastrolilli, M., Solis-Oba, R. (2000, April). Approximation algorithms for flexible job shop problems. In *Latin American Symposium on Theoretical Informatics*, 68-77. Springer, Berlin.
- Jeffrey, H., Sedgwick, J., Gerrard, G. (2014). Public funding for ocean energy: A comparison of the UK and US. *Technological Forecasting and Social Change*, 84, 155-170.
- Johnson, S.M. (1954). Optimal Two and Three Stage Production Schedules with Setup Times Included. *Naval Research Logistics Quarterly*, vol. 1, 61-68.
- Jokubauskaitė, S., Hössinger, R., Aschauer, F., Gerike, R., Jara-Díaz, S., Peer, S., Schmid, B., Axhausen, K.W., Leisch, F. (2019). Advanced continuous-discrete model for joint time-use expenditure and mode choice estimation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 129, 397-421.
- Jurisch, B. (1992). Scheduling jobs in shops with multi-purpose machines. PhD, Osnabrück, Germany.
- Kacem, I., Hammadi, S., Borne, P. (2002). Approach by localization and multiobjective evolutionary optimization for flexible job-shop scheduling problems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 32(1), 1-13.
- Karafotias, G., Hoogendoorn, M., Eiben, Á.E. (2014). Parameter control in evolutionary algorithms: Trends and challenges. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 19(2), 167-187.
- Kharraja, S. (2003). Outils d'aide à la planification et l'ordonnancement des plateaux médico-techniques. Thèse de doctorat, Université Jean Monnet.
- Kheiri, A., Keedwell, E., Gibson, M.J., Savic, D. (2015). Sequence analysis-based hyper-heuristics for water distribution network optimisation. *Procedia Engineering*, 119, 1269-1277.
- Kis, T., Pesch, E. (2005). A review of exact solutions methods for the non-preemptive multi-processor flowshop problem. *European Journal of Operations Research* 164, 592-608.
- Komaki, G.M., Sheikh, S., Malakooti, B. (2019). Flow shop scheduling problems with assembly operations: a review and new trends. *International Journal of Production Research*, 57(10), 2926-2955.
- Krupa, J., Harvey, L.D. (2017). Renewable electricity finance in the United States: A state-of-the-art review. *Energy*, 135, 913-929.
- Lange, J., Werner, F. (2018). Approaches to modeling train scheduling problems as job-shop problems with blocking constraints. *Journal of Scheduling*, 21(2), 191-207.
- Lange, J., Werner, F. (2019). A Permutation-Based Heuristic Method for the Blocking Job Shop Scheduling Problem. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1403-1408.
- Le Besnerais, J., Lanfranchi, V., Hecquet, M., Brochet, P. (2008). Multiobjective optimization of induction machines including mixed variables and noise minimization. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(6), 1102-1105.
- Le Hesran, C., Ladier, A.L., Botta-Genoulaz, V., Laforest, V. (2020). A methodology for the identification of waste-minimizing scheduling problems. *Journal of Cleaner Production*, 246, 119023.

- Lee, K. (2017). Financing industrial development in Korea and implications for Africa. African Development Bank (AfDB). *Industrialize Africa: Strategies, Policies, Institutions, and Financing*. Africa Development Bank Group. Abidjan, 197-213.
- Lei, C., Zhao, N., Ye, S., Wu, X. (2020). Memetic algorithm for solving flexible flow-shop scheduling problems with dynamic transport waiting times. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 105984.
- Lenstra, J.K, Rinnooy Kan, A.H.G., Brucker, P. (1977). Complexity of machine scheduling problems. *Annals of Discrete Mathematics*, vol. 1, 343-362.
- Leyman, P., Vanhoucke, M. (2015). A new scheduling technique for the resource-constrained project scheduling problem with discounted cash flows, *International Journal of Production Research*, 53(9), 2771-2786.
- Li, J. (2020). Resource optimization scheduling and allocation for hierarchical distributed cloud service system in smart city. *Future Generation Computer Systems* 107, 247-256.
- Li, W., Özcan, E., John, R. (2017). Multi-objective evolutionary algorithms and hyper-heuristics for wind farm layout optimisation. *Renewable Energy*, 105, 473-482.
- Li, Y., Li, F., Pan, Q.K., Gao, L., Tasgetiren, M.F. (2019). An Artificial Bee Colony Algorithm for the Distributed Hybrid Flowshop Scheduling Problem. *Procedia Manufacturing*, 39, 1158-1166.
- Lin, J. (2019). Backtracking search based hyper-heuristic for the flexible job-shop scheduling problem with fuzzy processing time. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 77, 186-196.
- Lin, J., Wang, Z.J., Li, X. (2017). A backtracking search hyper-heuristic for the distributed assembly flow-shop scheduling problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, 36, 124-135.
- Lin, J., Zhu, L., Gao, K. (2020). A genetic programming hyper-heuristic approach for the multi-skill resource constrained project scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 140, 112915.
- Liu, M., Liu, X., Chu, F., Zheng, F., Chu, C. (2020). Profit-oriented distributionally robust chance constrained flowshop scheduling considering credit risk. *International Journal of Production Research*, 1-23.
- Lozada Sanchez, J., Sauvey C., Sauer N. (2011). Heuristic for HFS problem with spécial blocking constraint. *Conférence ROADEF*, St Etienne, France.
- Luo, Y., Chen, W., Liu, S., Li, Q., Ma, Y. (2020). A discrete-continuous parameterization (DCP) for concurrent optimization of structural topologies and continuous material orientations. *Composite Structures*, 111900.
- Mallol-Poyato, R., Salcedo-Sanz, S., Jiménez-Fernández, S., Díaz-Villar, P. (2015). Optimal discharge scheduling of energy storage systems in MicroGrids based on hyper-heuristics. *Renewable Energy*, 83, 13-24.
- Marichelvam, M.K., Geetha, M., Tosun, Ö. (2020). An improved particle swarm optimization algorithm to solve hybrid flowshop scheduling problems with the effect of human factors—A case study. *Computers & Operations Research*, 114, 104812.

- Martinez, S. (2005). Ordonnancement de systèmes de production avec contraintes de blocage. Thèse de Doctorat, Université de Nantes.
- Martinez, S., Dauzère-Pérès, S., Guéret, C., Mati, Y., Sauer, N. (2006). Complexity of Flow-Shop scheduling problems with a new blocking constraint. *European Journal of Operational Research*, vol. 169(3), 855-864.
- Martino, S., Amos, C.L. (2015). Valuation of the ecosystem services of beach nourishment in decision-making: The case study of Tarquinia Lido, Italy. *Ocean & Coastal Management*, 111, 82-91.
- Mathur, P., Swartz, C.L., Zyngier, D., Welt, F. (2020). Uncertainty management via online scheduling for optimal short-term operation of cascaded hydropower systems. *Computers and Chemical Engineering*, 134, 106677.
- Mati, Y. (2002). Les problèmes d'ordonnancement dans les systèmes de production automatisés: Modèle, Complexité. Thèse de Doctorat, Université de Metz.
- Mati, Y., Xie, X. (2004). The complexity of two-job shop problems with multi-purpose unrelated machines. *European Journal of Operational Research* 152, 159-169.
- McCormick, S.T., Pinedo, M.L., Shenker, S., Wolf, B. (1989). Sequencing in an assembly line with blocking to minimize cycle time. *Operations Research* 37, 925-936.
- Miranda, P.B., Prudêncio, R.B., Pappa, G.L. (2017). H3AD: A hybrid hyper-heuristic for algorithm design. *Information Sciences*, 414, 340-354.
- Miyata, H.H., Nagano, M.S. (2019). The blocking flow shop scheduling problem: A comprehensive and conceptual review. *Expert Systems with Applications*, 137, 130-156.
- Muklason, A., Irianti, R.G., Marom, A. (2019). Automated Course Timetabling Optimization Using Tabu-Variable Neighborhood Search Based Hyper-Heuristic Algorithm. *Procedia Computer Science*, 161, 656-664.
- Murray, C. (2017). Public funding of energy research. *Joule*, 1(2), 204-208.
- Nawaz, M., Ensore, E., Ham, I. (1983). A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. *OMEGA, The International Journal of Management Science*, vol. 11(1), 91-95.
- Neumann, K., Schneider, W.G. (1999). Heuristic algorithms for job-shop scheduling problems with stochastic precedence constraints. *Annals of Operations Research*, 92, 45-63.
- Ning, T., Wang, Z., Zhang, P., Gou, T. (2020). Integrated optimization of disruption management and scheduling for reducing carbon emission in manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 121449.
- Nouiri, M., Bekrar, A., Trentesaux, D. (2019). An energy-efficient scheduling and rescheduling method for production and logistics systems. *International Journal of Production Research*, 1-21.
- Opeyemi, A., Uchenna, E., Simplice, A., Evans, O. (2019). Renewable energy, trade performance and the conditional role of finance and institutional capacity in sub-Saharan African countries. *Energy Policy*, 132, 490-498.

- Oulamara, A. (2009). Contribution à l'étude des problèmes d'ordonnancement flowshop avec contraintes supplémentaires: Complexité et méthodes de résolution. Habilitation à diriger des recherches, INPL, Nancy, France.
- Öztop, H., Tasgetiren, M.F., Eliiyi, D.T., Pan, Q.K., Kandiller, L. (2020). An energy-efficient permutation flowshop scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 150, 113279.
- Pacheco, A., Sauvey, C., Sauer, N., Trabelsi, W. (2017). Heuristics for hybrid flowshop problem solving with non-identical parallel machines, 7th I4E2 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IESM'17, October 11-13, Saarbrücken, Germany.
- Pandiri, V., Singh, A. (2018). A hyper-heuristic based artificial bee colony algorithm for k-interconnected multi-depot multi-traveling salesman problem. *Information Sciences*, 463, 261-281.
- Papadimitriou, C., Kanellakis, P. (1980). Flow-shop scheduling with limited temporary storage. *Journal of the Association for Computing Machinery*, vol. 27, 533-549.
- Patterson, P. (1996). What makes a well-oiled scheduling system? *OR Manager*, 12(9), 19-23.
- Perregaard M. (1995). Branch-and-Bound methods for the multi-Processor Job Shop and Flow Shop scheduling problems. Department of Computer Science, University of Copenhagen. Thèse de Doctorat, Master's Thesis.
- Pezzella, F., Merelli, E. (2000). Tabu search method guided by shifting bottleneck for the job shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 120, 297-310.
- Pinot, G., Mebarki, N. (2008). Best-case lower bounds in a group sequence for the job shop problem. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 14876-14881.
- Polenghi, A., Roda, I., Macchi, M., Trucco, P. (2019, September). Risk Sources Affecting the Asset Management Decision-Making Process in Manufacturing: A Systematic Review of the Literature. In *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems* (pp. 274-282). Springer, Cham.
- Poongodi, M., Sharma, A., Vijayakumar, V., Bhardwaj, V., Sharma, A.P., Iqbal, R., Kumar, R. (2020). Prediction of the price of Ethereum blockchain cryptocurrency in an industrial finance system. *Computers & Electrical Engineering*, 81, 106527.
- Portmann, M.C., Oulamara, A. (2006). Optimisation discrète. *Techniques de l'ingénieur. Informatique industrielle*, 1.S7211.
- Pour, S.M., Drake, J.H., Burke, E.K. (2018). A choice function hyper-heuristic framework for the allocation of maintenance tasks in Danish railways. *Computers Operations Research*, 93, 15-26.
- Prot, D., Bellenguez-Morineau, O. (2012). Tabu search and lower bound for an industrial complex shop scheduling problem. *Computers and Industrial Engineering*, 62(4), 1109-1118.
- Quinton, F., Hamaz, I., Houssin, L. (2020). A mixed integer linear programming modelling for the flexible cyclic jobshop problem. *Annals of Operations Research*, 285(1), 335-352.

- Rabadi, G., Msakni, M.K., Rodriguez-Velasquez, E., Alvarez-Bermudez, W. (2019). New characteristics of optimal solutions for the two-machine flowshop problem with unlimited buffers. *Journal of the Operational Research Society*, 70(6), 962-973.
- Raikar, S., Adamson S. (2020). Chap. 13 Renewable energy finance in the international context, *Renewable Energy Finance*, Academic Press, pp. 185-220, ISBN 9780128164419.
- Rajaguru, P., Lu, H., Bailey, C., Castellazzi, A., Pathirana, V., Udugampola, N., Udrea, F. (2018). Impact of underfill and other physical dimensions on Silicon Lateral IGBT package reliability using computer model with discrete and continuous design variables. *Microelectronics Reliability*, 83, 146-156.
- Röck, H. (1984). The three machine no-wait flowshop problem is NP-complete. *Journal of the Association of Computer Machinery*, vol. 31, 336-345.
- Roda, I., Macchi, M. (2018). A framework to embed Asset Management in production companies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 232(4), 368-378.
- Ronconi, D.P. (2005). A Branch-and-Bound Algorithm to Minimize the Makespan in a Flow-Shop with Blocking. *Annals of Operations Research*, 53-65.
- Rossit, D.A., Tohmé, F., Frutos, M. (2019). Production planning and scheduling in Cyber-Physical Production Systems: a review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(4-5), 385-395.
- Rossi-Turck, D. (2002). Comment garantir la qualité et la sécurité au bloc opératoire par une programmation et une logistique innovante. *Santé et Systémique*, 6, 179-196.
- Ruiz, R., Vazquez-Rodriguez, J.A. (2010). The hybrid flowshop scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 205, 1-18.
- Saadani, N.H., Guinet, A., Moalla, M. (2003). Three stages no-idle flow-shop. *Computers and Industrial Engineering Journal*, Vol. 44, n° 399, 425-434.
- Sabouni, M.Y., Logendran, R. (2018). Lower bound development in a flow shop electronic assembly problem with carryover sequence-dependent setup time. *Computers & Industrial Engineering*, 122, 149-160.
- Sánchez-Herrera, S., Montoya-Torres, J.R., Solano-Charris, E.L. (2019). Flow shop scheduling problem with position-dependent processing times. *Computers & Operations Research*, 111, 325-345.
- Santos, D.L., Hunsucker, J.L., Deal, D.E. (1995). Global lower bounds for flow shops with multiple processors. *European Journal of Operational Research*, vol. 80, 112-120.
- Sauvey, C. (2000). Contribution méthodologique à la modélisation pour le dimensionnement de moteurs à réluctance variable. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France.
- Sauvey, C., Melo, T., Correia, I., (2020). Heuristics for a multi-period facility location problem with delayed demand satisfaction. *Computers and Industrial Engineering* 139, 106171.

- Sauvey, C., Sauer, N. (2009). Heuristique pour la résolution des problèmes d'ordonnancement de type FlowShop avec blocage *RCb*. ROADEF'2009, 236.
- Sauvey, C., Sauer, N. (2012). A genetic algorithm with genes-association recognition for flowshop scheduling problems, *Journal of Intelligent Manufacturing* 23, 1167-1177.
- Sauvey, C., Sauer, N. (2020). Two NEH Heuristic Improvements for Flowshop Scheduling Problem with Makespan Criterion. *Algorithms*, 13(5), 112.
- Sauvey, C., Sauer, N., Trabelsi, W. (2015a). Job-shop scheduling with mixed blocking constraints between operations. In *Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences* (331-342). Springer, Cham.
- Sauvey, C., Trabelsi, W. (2015b, September). Hybrid job shop scheduling with mixed blocking constraints between operations. In *2015 IEEE 20<sup>th</sup> Conference on Emerging Technologies Factory Automation (ETFA)* (1-8). IEEE.
- Sauvey, C., Trabelsi, W. (2019). Mathematical modelling of investment in new production means. *Prolog 2019*, June, Metz, France.
- Schutten, J.M.J. (1998). Practical job shop scheduling. *Annals of Operations Research* 83, 161-177.
- Shi, C., Zhao, C., Zhang, X., Guo, Y. (2020). Coupled discrete-continuum approach for railway ballast track and subgrade macro-meso analysis. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-16.
- Silav, A., Karasakal, O., Karasakal, E. (2019). Bi-objective missile rescheduling for a naval task group with dynamic disruptions. *Naval Research Logistics (NRL)*, 66(7), 596-615.
- Soler, E.M., de Sousa, V.A., da Costa, G.R. (2012). A modified primal-dual logarithmic-barrier method for solving the optimal power flow problem with discrete and continuous control variables. *European Journal of Operational Research*, 222(3), 616-622.
- Sotskov, Y.N. (1985). Optimal scheduling two jobs with regular criterion, *Design Processes Automating, Institute of Engineering Cybernetics of the Belarusian Academy of Sciences*, 86-95. (in Russian).
- Sotskov, Y.N., Shakhlevich, N.V. (1995). NP-hardness of shop-scheduling problems with three jobs. *Discrete Applied Mathematics*, 59(3), 237-266.
- Soukhal, A., Oulamara, A., Martineau, P. (2005). Complexity of flow shop scheduling problems with transportation constraints. *European Journal of Operational Research* 161, 32-41.
- Szmerekovsky, J.G. (2007). Single machine scheduling under market uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 177(1), 163-175.
- Thornton, H.W., Hunsucker, J.L. (2004). A new heuristic for minimal makespan in flow shops with multiple processors and no intermediate storage. *European Journal of Operational Research*, vol. 152, 96-114.
- Tian, S., Wang, T., Zhang, L., Wu, X. (2019). The Internet of Things enabled manufacturing enterprise information system design and shop floor dynamic scheduling optimisation. *Enterprise Information Systems*, 1-26.

- Tighazoui, A., Sauvey, C., Sauer, N. (2020a). Minimizing the total weighted waiting times on a single machine rescheduling: new approach. Soumis à Journal of Manufacturing Systems le 11 décembre 2019.
- Tighazoui, A., Sauvey, C., Sauer, N. (2020b). Predictive-reactive strategy for parallel machine rescheduling. Soumis à Computers and Operations Research le 2 octobre 2019, révision en cours.
- Tighazoui, A., Turki, S., Sauvey, C., Sauer, N. (2019). Optimal design of a manufacturing-remanufacturing-transport system within a reverse logistics chain. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 101(5-8), 1773-1791.
- Trabelsi, W. (2009). Développement d'heuristiques pour la résolution des problèmes d'ordonnancement. Master recherche, Université Paul Verlaine, Metz, France.
- Trabelsi, W. (2012). Résolution des problèmes de type Flowshop et Flowshop Hybrides avec contraintes de blocages variables entre machines successives. Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine, Metz, France.
- Trabelsi, W., Sauvey, C., Sauer N. (2011a). Complexity and Mathematical Model for Flowshop Problem Subject to Different Types of Blocking Constraint, IFAC Milan, Italie, Août.
- Trabelsi, W., Sauvey, C., Sauer N. (2011b). Mathematical Model and Lower Bound for Flowshop Problem with Mixed Blocking Constraints. IESM'2011, Metz, France.
- Trabelsi, W., Sauvey, C., Sauer, N. (2010). Heuristic methods for problems with blocking constraints solving jobshop scheduling, 8th IFAC International Conference on Modelling and Simulation, MOSIM'10, Hammamet, Tunisia, 10-12 May.
- Trabelsi, W., Sauvey, C., Sauer, N. (2012a). Heuristics and metaheuristics for mixed blocking constraints flowshop scheduling problems. Computers Operations Research, 39(11), 2520-2527.
- Trabelsi, W., Sauvey, C., Sauer, N. (2012b). Mathematical model and lower bound for hybrid flowshop problem with mixed blocking constraints. 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM'12, Bucharest, Romania, 23-25 May. IFAC Proceedings, Volume 14, Part 1, 1475-1480.
- Trabelsi, W., Sauvey, C., Sauer, N. (2013). Heuristiques pour le flowshop hybride avec blocage mixte, Conférence ROADEF, Troyes, France.
- Turki, S., Didukh, S., Sauvey, C., Rezg, N. (2017). Optimization and analysis of a manufacturing-remanufacturing-transport-warehousing system within a closed-loop supply chain. Sustainability, 9(4), 561.
- Turki, S., Sahraoui, S., Sauvey, C., Sauer, N. (2020). Optimal Manufacturing-Reconditioning Decisions in a Reverse Logistic System Under Periodic Mandatory Carbon Regulation. Applied Sciences, 10, 3534.
- Turki, S., Sauvey, C., Rezg, N. (2018). Modelling and optimization of a manufacturing/remanufacturing system with storage facility under carbon cap and trade policy. Journal of Cleaner Production, 193, 441-458.

- Uhlmann, I.R., Frazzon, E.M. (2018). Production rescheduling review: Opportunities for industrial integration and practical applications. *Journal of manufacturing systems*, 49, 186-193.
- Ünal, A.T., Ağralı, S., Taşkın, Z.C. (2019). A strong integer programming formulation for hybrid flowshop scheduling. *Journal of the Operational Research Society*, 1-11.
- Van der Stockt, S.A., Engelbrecht, A.P. (2018). Analysis of selection hyper-heuristics for population-based meta-heuristics in real-valued dynamic optimization. *Swarm and evolutionary computation*, 43, 127-146.
- Vignier, A. (1997). Contribution à la résolution des problèmes d'ordonnancement de type monogamme, multimachines (flow-shop hybride). Thèse de doctorat, Université de Tours, France.
- Voutsinas, T.G., Pappis, C.P. (2002). Scheduling jobs with values exponentially deteriorating over time. *International Journal of Production Economics*, 79(3), 163-169.
- Wang, S., Liu, M., Chu, C. (2015). A branch-and-bound algorithm for two-stage no-wait hybrid flow-shop scheduling. *International Journal of Production Research*, 53(4), 1143-1167.
- Weitzel, T., Glock, C.H. (2018). Energy management for stationary electric energy storage systems: A systematic literature review. *European Journal of Operational Research*, 264(2), 582-606.
- Wen, C., Huang, P., Li, Z., Lessan, J., Fu, L., Jiang, C., Xu, X. (2019). Train Dispatching Management with Data-Driven Approaches: A Comprehensive Review and Appraisal. *IEEE Access*, 7, 114547-114571.
- Wullink, G., Van Houdenhoven, M., Hans, E.W., van Oostrum, J.M., van der Lans, M., Kazemier, G. (2007). Closing emergency operating rooms improves efficiency. *Journal of Medical Systems*, 31(6), 543-546.
- Xie, J., Gao, L., Peng, K., Li, X., Li, H. (2019). Review on flexible job shop scheduling. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, 1(3), 67-77.
- Yazdani, M., Amiri, M., Zandieh, M. (2010). Flexible job-shop scheduling with parallel variable neighborhood search algorithm. *Expert Systems with Applications*, 37(1), 678-687.
- Yeo, K. T., Qiu, F. (2003). The value of management flexibility - a real option approach to investment evaluation. *International Journal of Project Management*, 21(4), 243-250.
- Yuan, K., Sauer, N., Sauvey, C. (2009). Application of EM algorithm to hybrid flow shop scheduling problems with a special blocking. 14th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA'09, Mallorca, Spain, 22-26 September.
- Zarrouk, R., Bennour, I.E., Jemai, A. (2019, January). Toward a Two-Level PSO for FJS Problem. In 2019 IEEE 17th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII) (pp. 75-82). IEEE.
- Zhang, B., Pan, Q.K., Gao, L., Li, X.Y., Meng, L., Peng, K.K. (2019). A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition for hybrid flowshop green scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 136, 325-344.

- Zhang, J., Ding, G., Zou, Y., Qin, S., Fu, J. (2019). Review of job shop scheduling research and its new perspectives under Industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(4), 1809-1830.
- Zhang, L., Tang, Q., Wu, Z., Wang, F. (2017). Mathematical modeling and evolutionary generation of rule sets for energy-efficient flexible job shops. *Energy*, 138, 210-227.



## Annexe : Liste des publications classées

### Articles de revues publiés

Fernandez, V., Fandino, J., **Sauvey, C.**, Yonnet, J.P., Reyne, G., Cugat, O. (2000). A design methodology for permanent magnet microbearings. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36, pp. 1919-1922.

**Sauvey, C.**, Bar, F., Rosnet, P., Wurtz, F., Fandino, J., Bignon, J. (2001). Intégration du calcul des racines d'un polynôme dans une méthodologie d'optimisation de type gradient. Revue internationale de génie électrique, vol. 4/1-2, pp.135-147.

Abba, G., Antoine, J.F., **Sauvey, C.**, Visa, C. (2004). Design elements for high speed SRM. Journal of Romanian Society of Mecatronics, Mecatronica, Vol. 3/1, pp.1-6, ISSN:1583-7653.

Antoine, J.F., Visa, C., **Sauvey, C.**, Abba, G. (2006). Approximate analytical model for hertzian elliptical contact problems, ASME Journal of Tribology, 128(3), pp.660-664.

Munteanu, G.E., **Sauvey, C.** (2008). Analytical Model of Heat Transfers in Very High Speed Electric Motors, Journal of Romanian Society of Mecatronics, Mecatronica, Vol. 8, n°1, 2008, pp. 58-64, ISSN: 1583-7653.

-----  
**Sauvey, C.** and Sauer, N. (2012). A genetic algorithm with genes-association recognition for flowshop scheduling problems, Journal of Intelligent Manufacturing (JIM), Vol. 23, pp. 1167–1177.

Trabelsi, W., **Sauvey, C.**, Sauer, N. (2012). Heuristics and metaheuristics for mixed blocking constraints flowshop scheduling problems, Computers & Operations Research (C&OR), Vol 39, pp. 2520–2527.

Turki, S., Didukh, S., **Sauvey, C.**, Rezg, N. (2017). Optimization and analysis of a manufacturing-remanufacturing-transport-warehousing system within a closed-loop supply chain. Sustainability, 9(4), p. 561.

Turki, S., **Sauvey, C.**, Rezg, N. (2018). Modelling and optimization of a manufacturing/remanufacturing system with storage facility under carbon cap and trade policy. Journal of Cleaner Production, 193, pp. 441-458.

Tighazoui, A., Turki, S., **Sauvey, C.**, Sauer, N. (2019). Optimal design of a manufacturing-remanufacturing-transport system within a reverse logistics chain. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 101(5-8), 1773-1791.

**Sauvey, C.**, Melo, T., Correia, I., (2020). Heuristics for a multi-period facility location problem with delayed demand satisfaction. Computers and Industrial Engineering 139, 106171.

**Sauvey, C.**, Trabelsi, W. and Sauer, N. (2020). Mathematical Model and Evaluation Function for Conflict-Free Warranted Makespan Minimization of Mixed Blocking Constraint Job-Shop Problems. Mathematics, 8(1), 121.

Turki, S., Sahraoui, S., **Sauvey, C.**, Sauer, N. (2020). Optimal manufacturing-reconditioning decisions in a reverse logistic system under periodic mandatory carbon regulation. *Applied Sciences*, 10(10), 3534.

**Sauvey, C.**, Sauer, N. (2020). Two NEH Heuristic Improvements for Flowshop Scheduling Problem with Makespan Criterion. *Algorithms*, 13(5), 112.

Bouguerra, A., **Sauvey, C.**, Sauer, N. (2020). A decision support tool for the urgent surgeries assignment problem. *Journal of Engineering Research*, 8(2), 227-250.

## **Articles de revue soumis**

*Sauvey, C. and Trabelsi, W. (2020). Investment model for a production line design in a context of high demand. Soumis à Industrial Management and Data Systems le 8 février 2019.*

*Tighazoui, A., **Sauvey, C.**, Sauer, N. (2020). Predictive-reactive strategy for parallel machine rescheduling. Soumis à Computers and Operations Research le 2 octobre 2019, Major Revisions, corrections en cours.*

*Tighazoui, A., **Sauvey, C.**, Sauer, N. (2020). Minimizing the total weighted waiting times on a single machine rescheduling: new approach. Soumis à Journal of Manufacturing Systems le 11 décembre 2019.*

## Articles de conférences ou congrès internationaux

- Sauvey, C., Wurtz, F., Bigeon, J., Binet, F.** (1999). A methodology for using morsels continuous linear functions in gradient optimisation of electrical devices. IEEE-IEMDC '99, 9-12 mai, Seattle, Washington USA.
- Sauvey, C., Wurtz, F., Bigeon, J., Binet, F.** (1999). A methodology for using least squares minimisation in gradient optimisation of electrical devices. IEEE-IEMDC '99, 9-12 mai 1999, Seattle, Washington USA.
- Sauvey, C., Wurtz, F., Bigeon, J.** (1999). Analytical gradient type optimisation of a Switched Reluctance Motor. IEEE-COMPUMAG '99, 25-28 octobre, Sapporo, Japon.
- Sauvey, C., Bar, F., Rosnet, P., Wurtz, F., Fadino, J., Bigeon, J.** (2000). A methodology for using roots of a polynomial in gradient optimisation of electrical devices. IEEE-CEFC'2000, 4-7 juin, Milwaukee, Wisconsin, USA.
- Abba, G., Visa, C., Antoine, J.F., Fayard, H., Leonard, F., **Sauvey, C.** (2002). Design and control of a high speed electrospindle for metal cutting. In PRASIC'02, pp. 25-32, Brasov, Romania.
- Antoine, J.F., Abba, G., **Sauvey, C.** (2003). Approximate explicit calculation of first vibration frequencies of an unsymmetrical high speed rotor. ASME-IMECE'2003, Washington D.C., 55133.pdf, USA, Novembre.
- Visa, C., Abba, G., Leonard, F., Antoine, J.F., **Sauvey, C.** (2004). Nonlinear identification and control of a switched reluctance motor, 6<sup>th</sup> IFAC symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS), Stuttgart, 1-3 september, pp.1463-1468.
- Visa, C., Abba, G., Leonard, F., Antoine, J.F., **Sauvey, C.** (2004). Parameters identification of the switched reluctance motor without position sensor, 11<sup>th</sup> IFAC symposium on automation in mining, mineral and metal processing, (MMM), Nancy, France, 8-11 September.
- Sauvey, C.**, Antoine, J.F., Visa, C., Abba, G. (2005). Optimization of the design for a switched reluctance drive controlled by trapezoidal shaped currents, 44<sup>th</sup> IEEE CDC-ECC 2005, CdRom 0822.pdf, Seville, Spain, 12-15 December.
- Antoine, J.F., Visa, C., Abba, G., **Sauvey, C.** (2006). Electro spindle design for high speed machining, Proc. of the 5<sup>th</sup> International congress on High Speed Machining, HSM, Metz, France, 14-16 mars, pp.329-340.
- Saint-Eve, F., **Sauvey, C.**, Abba, G. (2006). A 100kHz-2kW converter for switched reluctance motor used in high speed machining applications, 32<sup>nd</sup> IEEE Industrial Electronics Conf. 2006, IECON'06, Paris, 7-10 November, CdRom : 1198.pdf.
- 
- Sauvey, C.** and Sauer, N. (2009). Initial populations tests for genetic algorithm flowshop scheduling problems solving with a special blocking. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), 13 (PART 1), pp. 1965-1970.
- Yuan, K., Sauer, N., **Sauvey, C.** (2009). Application of EM algorithm to hybrid flow shop scheduling problems with a special blocking. 14<sup>th</sup> IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA'09, Mallorca, Spain, 22-26 September.

- Trabelsi, W., Sauvey, C., Sauer, N. (2010). Heuristic methods for problems with blocking constraints solving jobshop scheduling, 8<sup>th</sup> IFAC International Conference on Modelling and Simulation, MOSIM'10, Hammamet, Tunisia, 10-12 May.
- Sauvey, C., Sauer, N.** (2010). An efficient genetic algorithm for permutation flowshop problem with particular blocking", 8<sup>th</sup> IFAC International Conference on Modelling and Simulation, MOSIM'10, Hammamet, Tunisia, 10-12 May.
- Trabelsi, W., Sauvey, C., Sauer, N. (2011). Mathematical Model and Lower Bound for Flowshop Problem With Mixed Blocking Constraints, 4<sup>th</sup> I4E2 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IESM'11, Metz, France, 25-27 May.
- Trabelsi, W., Sauvey, C., Sauer, N. (2011). Complexity and mathematical model for flowshop problem subject to different types of blocking constraint. 18<sup>th</sup> IFAC World congress, Milano, Italy, August 28<sup>th</sup> – September 2<sup>nd</sup>, Proceedings Volumes 18, pp. 8183-8188.
- Gorine, A., Sauvey, C., Sauer, N. (2012). Mathematical model and lower bounds for multi stage jobshop scheduling problem with special blocking constraint. 14<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM'12, Bucharest, Romania, 23-25 May. IFAC Proceedings, Volume 14, Part 1, pp.98-104.
- Trabelsi, W., Sauvey, C., Sauer, N. (2012). Mathematical model and lower bound for hybrid flowshop problem with mixed blocking constraints. 14<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM'12, Bucharest, Romania, 23-25 May. IFAC Proceedings, Volume 14, Part 1, pp. 1475-1480.
- Trabelsi, W., Sauvey, C., Sauer, N. (2013). A genetic algorithm for hybrid flowshop problem with mixed blocking constraints. IFAC Conference on Manufacturing, Modelling Management and Control, MIM'13. Saint Petersburg, Russia, 19-21 June.
- Bouguerra, A., Sauvey, C., Sauer, N. (2015). Mathematical model for maximizing operating rooms utilization. 15<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM'15, Ottawa, Canada, 11-13 May. IFAC-PapersOnLine, Volume 48, Issue 3, pp. 118-123.
- Sauvey, C., Sauer, N., Trabelsi, W.** (2015). Job-shop scheduling with mixed blocking constraints between operations. Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences, MCO'15, 11-13 May, Metz, France.
- Sauvey, C., Trabelsi, W.** (2015). Hybrid job shop scheduling with mixed blocking constraints between operations. 20<sup>th</sup> IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. ETFA'15. Luxemburg City. 8-11 September.
- Bouguerra, A., Sauvey, C., Sauer, N. (2016). Online emergent strategies for emergent, urgent and work-in-cases surgeries in an operating theatre. 3<sup>rd</sup> IEEE International Conference on Control, Decision and Information Technologies. CODIT'16. 6-8 April, Saint-Julian's, Malta.
- Pacheco, A., Sauvey, C., Sauer, N., Trabelsi, W. (2017). Heuristics for hybrid flowshop problem solving with non-identical parallel machines, 7<sup>th</sup> I4E2 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IESM'17, October 11-13, Saarbrücken, Germany.

Correia, I., Melo, T., **Sauvey, C.** (2019). Two-phase heuristics for a multi-period facility location problem with delayed demand satisfaction. 25<sup>th</sup> Euro Working Group on Locational Analysis conference, 5-7 June, 2019, Brussels, Belgium.

**Sauvey, C.**, Trabelsi, W. (2019). Mathematical modelling of investment in new production means. 5<sup>th</sup> edition of the International Conference on (PROJECT & LOGISTICS). June, 19-21, Metz, France.

Tighazoui, A., **Sauvey, C.**, Sauer, N. (2020). New efficiency-stability criterion in a rescheduling problem with dynamic jobs weights. 7<sup>th</sup> IEEE International Conference on Control, Decision and Information Technologies. CODIT'20, 29/06 – 02/07, Prague, République Tchèque.

Tighazoui, A., **Sauvey, C.**, Sauer, N. (2020). Predictive-reactive strategy for operating rooms rescheduling. SHeIC'20, 30 septembre – 2 octobre, Troyes, France.

## Articles de conférences ou congrès nationaux

- Sauvey, C.**, Bar, F., Rosnet, P., Wurtz, F., Fandino, J., Bigeon, J. (2000). Intégration du calcul des racines d'un polynôme dans une méthodologie d'optimisation de type gradient, NUMELEC '2000, 20-22 mars, Futuroscope, Poitiers, France.
- Antoine, J.F., **Sauvey, C.**, Visa, C., Abba, G. (2003). Optimisation de la forme d'un rotor de MRV 6/2 pour l'usinage à grande vitesse, Electrotechnique du Futur, CdRom Ref.24, pp.1-6, Supelec, 9-10 décembre.
- Visa, C., Antoine, J.F., **Sauvey, C.**, Leonard, F., Abba, G. (2005). Observateur à entrée inconnue pour une MRV, Journées Doctorales et Nationales du GdR MACS, Lyon, 5-7 septembre, CdRom 92.pdf.
- Sauvey, C.**, Abba, G., Antoine, J.F., Visa, C. (2005). Optimisation et dimensionnement d'une MRV 6/2 à très grande vitesse, Electrotechnique du Futur, CdRom II-01.pdf, Grenoble, 14-15 septembre.
- Sixdenier, F., Morel, L., Masson, J.P., Visa, C., **Sauvey, C.** (2005). Vers des outils de validation pour actionneurs grande vitesse, Electrotechnique du Futur, CdRom II-03.pdf, Grenoble, 14-15 septembre.
- Antoine, J.F., Abba, G., Visa, C., **Sauvey, C.** (2005). Résolution approchée du contact de Hertz dans un roulement à billes, Congrès Français de Mécanique, Troyes, France, 29 août - 2 septembre.
- Sauvey, C.**, Boloni, F. (2007). Modélisation modulaire orientée objet des moteurs à réluctance variable, Electrotechnique du Futur, CdRom text101.pdf, Toulouse, 6 et 7 septembre.
- 
- Sauvey C.**, Sauer N. (2009). Heuristique spéciale pour la résolution des problèmes d'ordonnancement de type FlowShop avec blocage RC, Conférence ROADEF, pp. 236-237, Nancy, France, février.
- Lozada Sanchez, J., **Sauvey C.**, Sauer N. (2011). Heuristic for HFS problem with spécial blocking constraint, Conférence ROADEF, St Etienne, France.
- Trabelsi, W., **Sauvey, C.**, Sauer, N. (2013). Heuristiques pour le flowshop hybride avec blocage mixte, Conférence ROADEF, Troyes, France.
- Bouguerra, A., **Sauvey, C.**, Sauer, N. (2015). Ordonnancement des opérations électives et urgentes dans un bloc opératoire. 16ème congrès annuel de la Société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision (ROADEF'15), 25-27 février, Marseille.