

Chapitre 1

Introduction

L'organisation et la gestion de la production conditionnent le succès des projets du monde de l'entreprise et de la recherche. Dans ce processus, la fonction ordonnancement vise à organiser l'utilisation des ressources technologiques ou humaines pour répondre à une demande ou satisfaire un plan de production préparé par la fonction planification. Ainsi, des programmes ambitieux privés ou publics ont recours à la fonction ordonnancement pour appréhender la complexité, améliorer les délais ou même s'adapter à des événements imprévus. Les problèmes d'ordonnancement apparaissent dans de nombreux domaines : l'industrie (atelier, gestion de production), la construction (suivi de projets), mais aussi l'informatique (gestion des processus) et l'administration (emplois du temps).

Un problème d'ordonnancement est composé de façon générale d'un ensemble de tâches soumises à certaines contraintes, et dont l'exécution nécessite des ressources. Résoudre un problème d'ordonnancement consiste à organiser ces tâches, c'est-à-dire à déterminer leurs dates de démarrage et d'achèvement, et à leur attribuer des ressources, de telle sorte que les contraintes soient respectées. Les problèmes d'ordonnancement sont très variés. Ils sont caractérisés par un grand nombre de paramètres relatifs aux tâches (morcelables ou non, indépendantes ou non, durées fixes ou non), aux ressources (renouvelables ou consommables), aux types de contraintes portant sur les tâches (contraintes temporelles, fenêtres de temps ...), aux critères d'optimalité liés au temps (délai total, délai moyen, retards ...), aux ressources (quantité utilisée, taux d'occupation ...) ou à d'autres coûts (production, lancement, stockage ...). Parmi tous ces problèmes, nous nous intéresserons à l'optimisation de critères réguliers¹ pour des problèmes d'atelier et de fournées classés NP-Difficiles.

Dans un problème d'atelier, une pièce doit être usinée ou assemblée sur différentes machines. Chaque machine est une ressource disjonctive, c'est-à-dire qu'elle ne peut exécuter qu'une tâche à la fois, et les tâches sont liées exclusivement par des contraintes d'enchaînement. Plus précisément, les tâches sont regroupées en n entités appelées travaux ou lots. Chaque lot est constitué de m tâches à exécuter sur m machines distinctes. Il existe trois types de problèmes d'atelier, selon la nature des contraintes liant les tâches d'un même lot. Lorsque l'ordre de passage de chaque lot est fixé et commun à tous les lots, on parle d'atelier à cheminement unique (*flow-shop*). Si cet ordre est fixé mais propre à chaque lot, il s'agit d'un atelier à cheminements multiples (*job-shop*). Enfin, si le séquençement des tâches des travaux n'est pas imposé, on parle d'atelier à cheminements libres (*open-shop*). Un critère d'optimalité souvent étudié est la minimisation du délai total de l'ordonnancement (*makespan*). Ce critère est particulièrement intéressant puisque les ordonnancements au plus tôt constituent des sous-ensembles dominants² pour de nombreux critères réguliers. De plus, l'analyse des ordonnancements au plus tôt permet de déterminer des chemins critiques, c'est-à-dire des chemins sur lesquels tout retard a des conséquences sur toute la chaîne, ou des goulots d'étranglement, c'est-à-dire les étapes qui vont limiter la production de tout l'atelier.

Une machine à traitement par fournées permet de traiter plusieurs tâches en une seule opération, une fournée. Les dates de début et de fin des tâches appartenant à une même fournée sont identiques. Les machines à traitement par fournées diffèrent généralement par les contraintes sur l'ordonnancement des

1. Un critère d'évaluation numérique ou fonction objectif est dit régulier si l'on ne peut le dégrader en avançant l'exécution d'une tâche.

2. Un ensemble de solutions d'un problème d'optimisation est dit dominant s'il contient au moins une solution optimale.

fournées ou celles restreignant les fournées réalisables. La résolution exacte des problèmes de fournées est encore un sujet récent et peu abordé. Nous nous intéresserons à la minimisation du retard algébrique maximal de n tâches de différentes tailles sur une machine à traitement par fournées pour laquelle la somme des tailles des tâches d'une fournée réalisable ne doit pas excéder la capacité b de la machine.

Durant les dernières décennies, la Programmation Par Contraintes (PPC) est devenue une approche efficace pour modéliser et résoudre les problèmes d'ordonnancement. La PPC permet de séparer le modèle décrit grâce à un langage déclaratif (tâches, ressources, contraintes, objectif) des algorithmes employés durant la résolution. Ces travaux visent à faciliter l'interaction entre les modèles et les décideurs par l'intégration d'outils utiles dans un contexte d'aide à la décision. Ainsi, la flexibilité de modélisation, les méthodes structurelles de reformulation, la gestion dynamique des contraintes permettent d'appliquer des méthodes de simulation, de planification, ou même de diagnostic. Les méthodes de résolution telles que la réduction de domaines et la propagation de contraintes combinées à des algorithmes de recherche efficaces, exhaustifs ou non, ont permis la résolution de nombreux problèmes industriels. De nos jours, ces méthodes sont de plus en plus couplées avec des techniques de Recherche Opérationnelle (RO), telles que la programmation linéaire, entière ou mixte, pour élaborer des algorithmes efficaces dédiés à l'optimisation.

1.1 Objectifs

L'objectif de cette thèse est d'étudier la résolution exacte des problèmes d'atelier et de fournées grâce à la programmation par contraintes. En effet, l'étude et la résolution efficace de ces problèmes permettent de mieux appréhender des systèmes industriels complexes dans lesquels ils sont des composantes essentielles. Par exemple, un problème d'atelier est une composante d'un problème d'ordonnancement cumulatif ou de fournées. De la même manière, les problèmes à une machine à traitement par fournées sont des composantes des problèmes à plusieurs machines.

Dans un premier temps, nous proposerons une *approche flexible et efficace pour la résolution exacte des problèmes d'atelier*. Sa conception reposera sur la classification et l'étude systématique (empirique et expérimentale) de différents modèles et stratégies de recherche. Cette étude identifiera un nombre restreint de configurations dominantes, mais sans fournir pour autant un critère permettant le choix a priori de la meilleure configuration. Nous proposerons aussi plusieurs nouvelles heuristiques de sélection de variable inspirées d'heuristiques dynamiques basées sur les domaines et les degrés³. Enfin, nous insisterons sur la méthodologie employée pour l'étude des interactions entre les modèles et les stratégies de recherche qui sont souvent négligées par les utilisateurs non spécialistes.

Dans un second temps, nous proposerons une *nouvelle approche pour la résolution exacte d'un problème de fournées*. problème maître de la décomposition est un problème de placement pour la construction des fournées réalisables et le sous-problème consiste à ordonnancer les fournées. La résolution sera renforcée par des techniques de filtrage basées sur les coûts exploitant une relaxation du problème définissant une nouvelle borne inférieure sur le retard algébrique maximal. Ces techniques, classiques en recherche opérationnelle, permettent de réduire l'espace de recherche et de mieux gérer les informations relatives au critère d'optimalité. Un modèle en programmation entière faiblement basé sur la décomposition sera aussi étudié à titre de comparaison. Nous montrerons la validité de notre décomposition pour d'autres problèmes où l'ordonnancement optimal des fournées respecte certaines conditions.

Pour finir, nous discuterons de la *diffusion des techniques d'ordonnancement sous contraintes par le biais de leur intégration dans le solveur de contraintes choco*. Nous nous intéresserons donc à la conception, à l'implémentation et à l'utilisation des modules d'ordonnancement et de placement développés au cours de cette thèse. La clarté, la flexibilité et la simplicité des algorithmes et structures de données seront discutées au regard de leur complexité spatiale et temporelle. Au cours de ce travail, les échanges avec les autres chercheurs et utilisateurs ont permis d'améliorer et de corriger les spécifications et quelquefois l'implémentation, mais surtout d'élargir considérablement nos axes de réflexion. Ainsi, nous aborderons une extension importante du problème d'ordonnancement, l'allocation de ressources, c'est-à-dire la prise en compte du choix des ressources utilisées pour réaliser les tâches et de l'ordonnancement des tâches sur les ressources utilisées.

3. Le degré d'une variable est le nombre de contraintes auxquelles elle appartient.

1.2 Contribution

Ce document décrit notre apport dans le domaine de l'ordonnancement sous contraintes selon trois axes principaux :

Méthodologique : nous proposons une approche méthodologique, adaptée aux problèmes d'ordonnement d'atelier et de fournées, pour la modélisation et la sélection des algorithmes de résolution.

Technique : nous introduisons de nouvelles techniques (heuristiques de recherche, contraintes globales) pour combler certaines lacunes identifiées grâce à notre méthodologie.

Logiciel : l'implémentation de ces techniques dans un solveur de contraintes facilite leur diffusion et leur mise en œuvre dans diverses applications.

Nous établissons une classification des modèles et algorithmes de résolution pour les problèmes d'atelier. Nous distinguons les modèles en fonction de la décomposition des contraintes globales, l'algorithme de recherche (prospectif, rétrospectif, redémarrages), des variables de décision et des heuristiques de sélection de variable et de valeur.

Nous proposons ensuite une nouvelle famille d'heuristiques dynamiques de sélection de variable utilisant activement la décomposition des contraintes globales. Ces heuristiques exploitent un mécanisme d'apprentissage du degré des variables pour guider la recherche à travers les parties difficiles ou inconsistantes. Les évaluations révéleront l'intérêt de la décomposition des contraintes globales et remettront en question l'utilisation systématique de celles-ci dans le contexte des problèmes d'atelier. De plus, nous identifierons certaines composantes critiques de notre approche comme la qualité de la solution initiale et l'utilisation de techniques de redémarrage.

Un module d'ordonnement pour le solveur de contraintes `choco` permet de reproduire nos expérimentations, mais aussi de définir de nouvelles contraintes et stratégies de recherche en spécialisant des classes génériques basées sur un type de variable modélisant une tâche.

Par ailleurs, l'intérêt des chercheurs en programmation par contraintes pour les problèmes de fournées est encore récent. Nous proposons d'abord un modèle par décomposition exploitant la richesse du langage déclaratif de modélisation. Le problème maître de la décomposition est un problème de placement pour la construction des fournées réalisables et le sous-problème consiste à ordonner les fournées. La modélisation du problème maître utilise les résultats des travaux en placement sous contraintes, notamment des contraintes globales et des stratégies de recherche. La nature du sous-problème change selon le critère d'optimalité.

Nous montrerons aussi l'intérêt d'une hybridation avec des techniques classiques en recherche opérationnelle pour la minimisation du retard algébrique maximal des fournées. Ainsi, nous proposons une nouvelle contrainte globale basée sur une relaxation du problème qui réalise un filtrage basé sur les coûts. Les évaluations montreront que ce filtrage basé sur les coûts entraîne une amélioration significative des performances. L'impact des décisions sur le critère d'optimisation est souvent géré moins efficacement par un solveur de contraintes que par un solveur de programmation mathématique. Finalement, nous proposerons une nouvelle heuristique de sélection de variable où l'allocation des tâches aux fournées est basée sur l'ordonnement des fournées plutôt que sur leur charge.

Nos contributions sur le solveur de contraintes `Choco` concernent principalement l'ordonnement, le placement et les stratégies de recherche, mais touchent aussi les interfaces de modélisation, débogage, expérimentation et de visualisation. Face à la quasi-impossibilité de proposer une liste exhaustive de contraintes, consistances et algorithmes/stratégies de résolution, nous chercherons une flexibilité accrue grâce à un langage déclaratif de haut niveau et des interfaces pour la spécification de contraintes et d'algorithmes de résolution. Au début de ce travail, seule une contrainte cumulative définie sur des variables entières était disponible. L'introduction d'un nouveau type de variable représentant les tâches offre dorénavant un accès à un catalogue de contraintes et de stratégies dédiées à l'ordonnement. De plus, l'utilisateur peut définir de nouvelles contraintes et stratégies dédiées à l'ordonnement qui héritent de classes abstraites ou génériques. Parallèlement, un module de placement en une dimension, développé dans le cadre des problèmes de fournées, met à disposition une contrainte globale ainsi que quelques stratégies de recherche et d'élimination des symétries.

L'implémentation des stratégies de recherche doit être robuste et efficace pour affronter la variété des applications possibles tout en restant flexible pour permettre leur modification. Nous discuterons aussi de l'implémentation des procédures d'optimisation et des redémarrages. Quelques outils génériques de

traitement d'une instance et d'expérimentation seront présentés pour leur intérêt pratique. En effet, ils réduisent l'effort d'implémentation, facilitent le diagnostic, améliorent la communication entre utilisateurs et procurent au final un gain de temps appréciable.

1.3 Organisation du document

L'objet de cette thèse est de présenter nos contributions dans le domaine de l'ordonnancement par contraintes par rapport aux travaux passés et présents. Nous avons choisi de privilégier la modélisation et la résolution complète de problèmes d'atelier et de fournées rencontrés en pratique plutôt qu'un aspect spécifique de l'ordonnancement sous contraintes. Ceci nous a conduit à l'organisation du manuscrit en deux parties décrites ci-dessous.

La première partie décrit le contexte de notre étude. Une présentation synthétique des concepts liés à la programmation par contraintes, l'optimisation sous contraintes et à l'ordonnancement sous contraintes est proposée aux chapitres 2 et 3. Les deux chapitres suivants introduisent deux familles de problèmes d'ordonnancement en résumant les principaux résultats de complexité et l'état de l'art. Le chapitre 4 présente un problème général d'ordonnancement d'atelier puis trois problèmes particuliers : l'open-shop, le flow-shop et le job-shop. Le chapitre 5 présente les problèmes de fournées en insistant sur ceux où les tâches ont des tailles différentes.

La seconde partie de ce document présente les éléments de contribution de cette thèse. Dans un premier temps, nous décrivons notre approche pour la résolution de problèmes d'atelier. Le chapitre 6 décrit les principes de notre algorithme de résolution basé sur l'amélioration d'une solution initiale obtenue de manière heuristique par une recherche arborescente avec redémarrages. Le chapitre 7 décrit plusieurs variantes de notre algorithme avec de nouvelles heuristiques de sélection de variable. Ensuite, le chapitre 8 décrit notre modèle basé sur une décomposition utilisant une contrainte globale réalisant un filtrage basé sur les coûts pour la résolution d'un problème de fournées où les tâches ont des tailles différentes. Finalement, le chapitre 9 aborde la conception et l'implémentation de plusieurs modules du solveur de contraintes **choco**. Finalement, nous concluons ce manuscrit en réalisant un bilan de cette thèse et en discutant des perspectives.

L'annexe A introduit des outils de développement et d'expérimentation disponibles dans le solveur **choco**. L'annexe B est un tutoriel **choco** pour l'ordonnancement et le placement sous contraintes. L'annexe C est une étude préliminaire sur la résolution de problèmes de tournées de véhicules. L'annexe D décrit des travaux préliminaires sur un problème d'allocation de ressources.

1.4 Diffusion scientifique

Les différents travaux présentés dans ce document ont fait l'objet de diverses publications et communications. Au début de cette thèse, une étude préliminaire sur les problèmes de tournées de véhicules avec contraintes de chargement nous a convaincu que le solveur **choco** n'était pas encore mûr pour traiter de tels problèmes malgré des travaux réalisés au sein de l'équipe sur des sujets connexes. Cette étude a fait l'objet d'un rapport technique [1] et d'une communication [2] lors d'un atelier de la conférence internationale *CPAIOR 2008 (International Conference on Integration of Artificial Intelligence (AI) and Operations Research (OR) techniques in Constraint Programming)*. Par contre, cette étude a révélé que les techniques d'ordonnancement sous contraintes jouaient un rôle crucial dans la résolution des problèmes de placement, mais aussi dans les problèmes de tournées avec fenêtres de temps.

Notre attention s'est alors portée sur les problèmes d'ordonnancement disjonctif qui sont souvent des composantes essentielles dans les problèmes d'ordonnancement ou de placement. Dans ce contexte, la méthode de résolution pour les problèmes d'atelier a fait l'objet d'un rapport technique [3], d'une communication lors des *Journées de l'Optimisation 2009* à Montréal, et finalement d'une publication [4] dans *Journal of Computing*. Entre-temps, des travaux complémentaires [5] proposant de nouvelles heuristiques de sélection ont quant à eux fait l'objet d'une publication dans la conférence internationale *CP 2009 (International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming)*. En parallèle, des travaux préliminaires sur les problèmes d'allocation de ressources ont fait l'objet d'une communication [6] lors d'un atelier de la conférence internationale *CP 2010* et d'un rapport technique [7].

Finalement, les résultats préliminaires sur les problèmes de fournées ont fait l'objet d'une première communication lors des *Journées de l'optimisation 2010*, puis d'un rapport technique [8]. La version définitive [9] a été soumise pour publication dans *European Journal of Operational Research* et a fait l'objet d'une communication sous la forme d'un résumé étendu lors de la conférence internationale *CPAIOR 2011*.

Bibliographie

- [1] Arnaud MALAPERT, Christelle GUÉRET, Narendra JUSSIEN, André LANGEVIN et Louis-Martin ROUSSEAU : Two-dimensional pickup and delivery routing problem with loading constraints. Rapport technique CIRRELT-2008-37, Centre Inter-universitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport, Montréal, Canada, 2008.
- [2] Arnaud MALAPERT, Christelle GUÉRET, Narendra JUSSIEN, André LANGEVIN et Louis-Martin ROUSSEAU : Two-dimensional pickup and delivery routing problem with loading constraints. In *First CPAIOR Workshop on Bin Packing and Placement Constraints (BPPC'08)*, Paris, France, mai 2008.
- [3] Arnaud MALAPERT, Hadrien CAMBAZARD, Christelle GUÉRET, Narendra JUSSIEN, André LANGEVIN et Louis-Martin ROUSSEAU : An optimal constraint programming approach to solve the open-shop problem. Rapport technique CIRRELT-2009-25, Centre Inter-universitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport, Montréal, Canada, 2009.
- [4] Arnaud MALAPERT, Hadrien CAMBAZARD, Christelle GUÉRET, Narendra JUSSIEN, André LANGEVIN et Louis-Martin ROUSSEAU : An optimal constraint programming approach to solve the open-shop problem. *Journal of Computing*, in press, accepted manuscript, 2011.
- [5] Diarmuid GRIMES, Emmanuel HEBRARD et Arnaud MALAPERT : Closing the open shop : Contradicting conventional wisdom. In *Principles and Practice of Constraint Programming - CP 2009*, volume 5732 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 400–408. Springer Berlin / Heidelberg, 2009.
- [6] Aliaa M. BADR, Arnaud MALAPERT et Kenneth N. BROWN : Modelling a maintenance scheduling problem with alternative resources. In *The 9th International Workshop on Constraint Modelling and Reformulation (CP10)*, St. Andrews, Scotland, september 2010.
- [7] Aliaa M. BADR, Arnaud MALAPERT et Kenneth N. BROWN : Modelling a maintenance scheduling problem with alternative resources. Rapport technique 10/3/INFO, École des Mines de Nantes, Nantes, France, 2010.
- [8] Arnaud MALAPERT, Christelle GUÉRET et Louis-Martin ROUSSEAU : A constraint programming approach for a batch processing problem with non-identical job sizes. Rapport technique 11/6/AUTO, École des Mines de Nantes, Nantes, France, june 2011.
- [9] Arnaud MALAPERT, Christelle GUÉRET et Louis-Martin ROUSSEAU : A constraint programming approach for a batch processing problem with non-identical job sizes. *European Journal of Operational Research*, in revision, submitted manuscript, april 2011.