

Planification intégrée de l'approvisionnement de matériaux et de l'ordonnancement de plusieurs projets de construction

par

Oumaima BEN SASSI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION
AUTOMATISÉE
M. Sc. A

MONTREAL, LE 26 JANVIER 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Oumaima Ben Sassi, 2022



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Amin Chaabane, directeur de mémoire
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Erik Andrew Poirier, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Julio Cesar Montecinos, membre du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Vendette, examinateur externe
C2.0

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 13 JANVIER 2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde et sincère gratitude à mon directeur de recherche, le professeur Amin Chaabane, pour la confiance qu'il m'a accordée, pour son temps, son encadrement précieux, ses nombreux conseils et tout ce que j'ai appris grâce à lui.

Je remercie également l'ÉTS, l'organisme Mitacs avec le programme Mitacs Accélération ainsi que l'initiative Partager pour bâtir pour le financement de ce projet qui m'a permis de bien me concentrer sur mes études et m'a motivé à tout donner pour bien réussir ce programme.

Mention spéciale aux chers partenaires qui ont supporté et qui ont contribué à ce projet C2.0 - Conseil en chaîne d'approvisionnement, Le Groupe Jenaco & Groupe Deschênes.

Ensuite, le chemin jusqu'ici n'a pas été facile, mais il a été possible grâce à certaines personnes. Tout d'abord, je dédie ce mémoire à l'âme de ma chère grand-mère, Mima. Ensuite, je tiens à remercier mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, même à 9000 km, ils ont pu me montrer leur amour et leur soutien. Merci pour vos encouragements qui m'ont donné de l'énergie et m'ont poussé à aller aussi loin que possible. Merci pour votre patience et merci pour votre confiance. Je ne saurais vous remercier assez pour tous vos sacrifices. Je remercie également ma chère grand-mère qui n'a cessé de prendre soin de moi et de se préoccuper de ma santé. Je remercie aussi ma chère belle-mère pour ses encouragements et son amour inconditionnel depuis toujours. Je remercie mes frères et mes sœurs pour être tout simplement dans ma vie pour l'embellir.

Je remercie spécialement mon cher partenaire, la personne qui a partagé tous les jours de ces deux années avec moi, les meilleurs et surtout les pires. Je n'aurais jamais su surmonter les défis que j'ai vécus sans ta présence et sans ton support en continu.

VI

Merci à mon chat Yummy d'être rentrée dans ma vie, de m'avoir accompagnée pendant toutes mes nuits blanches, d'avoir apporté le bonheur à la maison et d'avoir apporté le sourire sur mon visage pendant les moments difficiles.

Je désire remercier également mes meilleures amies qui ont été toujours là pour moi, sans les nommer, elles vont sûrement se reconnaître. Ce parcours n'aurait pu être le même sans votre soutien constant.

Je remercie aussi ma famille Instagram qui m'a accompagnée pendant tout ce processus, j'espère que vous êtes fiers de moi et que j'ai pu vous motiver et vous inspirer pour travailler fort sur vos objectifs.

Enfin, je me remercie. Je me remercie moi-même pour mes efforts tout au long de mon parcours, depuis la Tunisie vers la France et ensuite au Canada, pour les sacrifices, les moments difficiles et les problèmes de santé que j'ai eus, la démotivation que j'ai dû surmonter grâce à ma détermination, et pour tout ce que j'ai accompli jusqu'ici. Je suis fière de toi Ouma.

Planification intégrée de l'ordonnancement du projet et de l'approvisionnement de matériaux pour plusieurs projets de construction

Oumaima BEN SASSI

RÉSUMÉ

La planification intégrée de l'ordonnancement du projet et de la commande des matériaux (PSMO) pour plusieurs projets de construction peut fournir une meilleure coordination entre les différents membres de la chaîne d'approvisionnement de la construction (CSC), ce qui mène à la réduction du coût total de l'ensemble de la chaîne. Ce projet aborde donc le problème PSMO pour une chaîne d'approvisionnement à deux échelons, composée d'un fabricant de produits préfabriqués, d'un entrepôt et de plusieurs sites de construction où plusieurs projets de construction indépendants sont planifiés. Par conséquent, nous avons développé un modèle de programmation linéaire en nombres entiers mixtes visant à déterminer le calendrier du projet ainsi que le plan et la quantité de commandes des matériaux, tout en minimisant les coûts globaux liés au fabricant, à l'entrepôt et aux sites de construction. La fonction objectif comprend le coût de fabrication, le coût de commande, le coût de transport, le coût de possession des stocks, le coût des activités et le coût de la pénalité ou de la récompense due à l'achèvement précoce ou tardif du projet. La durée des activités du projet est traitée comme une variable de décision qui peut être soumise à une compression. Le modèle a été mis en œuvre en utilisant Pyomo, un langage de modélisation d'optimisation basé sur Python. Ensuite, l'applicabilité et l'efficacité du modèle proposé sont testées à travers une instance numérique pour démontrer les avantages de l'intégration de la CSC. Le modèle appartient aux problèmes NP-difficiles; ainsi, une procédure de décomposition a été suggérée pour servir de méthodologie de résolution aux problèmes de grande taille. Ensuite, certaines modifications du modèle ont été envisagées pour se rapprocher de la solution optimale. Des limites ainsi que des directions pour les recherches futures concernant ce problème ont été fournies.

Mots-clés: commande de matériaux, ordonnancement de projet, projet de construction, chaîne d'approvisionnement de la construction, intégration, modèle d'optimisation, programmation en nombres entiers mixtes.

Integrated multi-projects scheduling and material ordering planning in the construction supply chain

Oumaima BEN SASSI

ABSTRACT

Integrated planning of project scheduling and material ordering (PSMO) for multiple construction sites can provide more coordination between the different members of the construction supply chain (CSC), leading to total cost reduction for the entire supply chain. Hence, this project addresses the PSMO problem for a two-echelon construction supply chain composed of a manufacturer of prefabricated products, a warehouse, and multiple construction sites where multiple independent construction projects are planned. Consequently, we have developed a mixed-integer linear programming model to determine the project schedule and the material ordering plan and quantity while minimizing the overall costs related to the manufacturer, the warehouse, and the construction sites. The objective function consists of manufacturing cost, ordering cost, transportation costs, inventory holding costs, activities cost, and penalty or reward cost due to early or late completion of the project. The duration of project activities is treated as a decision variable that may be subject to crashing. The model was implemented using Pyomo, a Python-based open-source optimization modeling language. Then, the applicability and the efficiency of the proposed model were tested through a numerical example to demonstrate the benefits of CSC integration. The presented model falls within the class of NP-Hard problems; therefore, a decomposition procedure was suggested to serve as a solution methodology for large problems. Then, some modifications within the model were considered to approach the optimal solution. Limitations and future work directions regarding this problem were provided.

Keywords: material ordering, project scheduling, construction project, construction supply chain, integration, optimization model, mixed-integer programming.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE.....	9
1.1 Motivation.....	9
1.2 Objectifs.....	11
1.3 Méthodologie	12
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	15
2.1 Introduction.....	15
2.2 Modèles du problème PSMO.....	16
2.3 Limites des travaux actuels	30
CHAPITRE 3 PROBLÈME ET FORMULATION MATHÉMATIQUE.....	33
3.1 Énoncé du problème	33
3.2 Hypothèses.....	35
3.3 Formulation mathématique	36
3.3.1 Les indices et les ensembles	36
3.3.2 Les paramètres	37
3.3.3 Les variables de décision	38
3.3.4 La fonction objectif.....	39
3.3.5 Contraintes du modèle	40
3.4 Conclusion	43
CHAPITRE 4 VALIDATION DU MODÈLE	45
4.1 Exemple numérique	45
4.1.1 Les données.....	47
4.1.2 Implémentation du modèle mathématique.....	51
4.1.3 Résultats.....	51
4.1.3.1 Planification des activités des projets	51
4.1.3.2 Suivi des commandes.....	53
4.1.3.3 Coût total.....	56
4.1.3.4 Interprétation.....	56
4.2 Comparaison du problème intégré et du problème non-intégré.....	59
4.2.1 Comparaison des calendriers des activités.....	60
4.2.2 Comparaison des coûts	62
4.2.3 Comparaison de la quantité de production.....	63
4.2.4 Comparaison des niveaux de stock	64
4.2.5 Conclusion	65
CHAPITRE 5 PROPOSITION D'UNE MÉTHODE DE RÉOLUTION	67
5.1 Décomposition du modèle	67
5.1.1 Approche.....	67

5.1.2	Formulation.....	67
5.1.2.1	Premier sous-problème	67
5.1.2.2	Deuxième sous-problème.....	68
5.1.3	Résultats de l'exécution et comparaison avec le modèle intégré.....	69
5.1.3.1	Résultats du premier sous-problème.....	69
5.1.3.2	Résultats du deuxième sous-problème.....	70
5.1.3.3	Comparaison et interprétation des coûts	74
5.1.4	Conclusion	76
5.2	Amélioration des résultats de la décomposition	76
5.2.1	Motivation et approche	76
5.2.2	Modèle modifié.....	78
5.2.3	Validation du modèle après les changements apportés.....	79
5.2.3.1	Calcul de e_{ij} et l_{ij}	79
5.2.3.2	Résultats et comparaison avec le premier modèle	80
5.2.4	Résultats de l'exécution du modèle décomposé avec les changements....	82
5.3	Analyse de sensibilité au niveau de la décomposition.....	83
5.3.1	Changement de la valeur de fin au plus tard des activités	84
5.3.2	Augmentation du coût de commande par produit.....	86
5.3.3	Conclusion	91
CONCLUSION.....		93
ANNEXE I	COMPARAISON DES VARIABLES DE DÉCISION	97
ANNEXE II	COMPARAISON DES CARACTÉRISTIQUES.....	99
ANNEXE III	DÉTAILS DU COÛT TOTAL	101
ANNEXE IV	IMPACT DE CHANGEMENT D'AUGMENTATION DE L_{ij}	103
BIBLIOGRAPHIE.....		105

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Fonction objectif et méthodes de résolution dans la littérature pour le PSMO.....29
Tableau 4.1	Paramètres liés aux activités du projet de construction49
Tableau 4.2	Paramètres liés aux produits modulaires.....49
Tableau 4.3	Paramètres liés au stockage, au transport et aux projets50
Tableau 4.4	Éléments du coût total.....56
Tableau 4.5	Éléments du coût total sans la compression.....57
Tableau 4.6	Paramètres liés au projet i60
Tableau 4.7	Comparaison des coûts: modèle intégré et modèle non intégré.....62
Tableau 5.1	Comparaison des coûts du modèle intégré et du modèle décomposé.....75
Tableau 5.2	Calcul de e_{ij} et l_{ij}80
Tableau 5.3	Coûts et nombre de commandes du nouveau modèle décomposé.....82
Tableau 5.4	Comparaison des résultats de la décomposition83
Tableau 5.5	Résultats à la suite du changement de l_{ij}85
Tableau 5.6	Comparaison des éléments de coûts90

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Une chaîne d’approvisionnement typique2
Figure 1.2	Une chaîne d'approvisionnement de construction Adaptée de Studer & De Brito Mello (2021)3
Figure 1.1	Stratégie traditionnelle de gestion des projets de construction.....10
Figure 1.2	Méthodologie de recherche13
Figure 2.1	Approche intégrée PSMO16
Figure 2.2	Nombre d'articles par année de publication30
Figure 3.1	Méthodologie du développement du modèle33
Figure 3.2	Les éléments de la chaîne d'approvisionnement35
Figure 4.1	Exemple avec deux sites de construction.....46
Figure 4.2	Graphe des activités du site de construction i47
Figure 4.3	Module de salle de bain et panneau mural typiques préfabriqués Tirée de Antillón, Morris, & Gregor (2014)47
Figure 4.4	Profil de la demande pour chaque produit pour chaque projet par activité50
Figure 4.5	Planification des activités des deux projets52
Figure 4.6	Demande du produit 1 pour chaque chantier par période54
Figure 4.7	Suivi des commandes du produit 154
Figure 4.8	Demande du produit 2 pour chaque chantier par période55
Figure 4.9	Suivi des commandes du produit 255
Figure 4.10	Calendrier des deux projets sans compression.....58
Figure 4.11	Exemple d'une CSC avec deux sites de construction non intégrée.....59
Figure 4.12	Calendrier du projet 160

Figure 4.13	Calendrier du projet 2	61
Figure 4.14	Comparaison de la production du chaque produit par période	63
Figure 4.15	Niveau de stock dans l'usine du produit m à la période t.....	64
Figure 4.16	Niveau de stock dans l'entrepôt de chaque produit par période.....	64
Figure 5.1	Planification des projets dans le cas de décomposition	69
Figure 5.2	Profil de la demande de chaque produit dans le modèle décomposé.....	71
Figure 5.3	Profil de la demande de chaque produit dans le modèle intégré.....	71
Figure 5.4	Nombre de commandes: modèle décomposé.....	72
Figure 5.5	Nombre de commandes modèle intégré.....	72
Figure 5.6	Comparaison du niveau de stock dans l'usine.....	73
Figure 5.7	Comparaison du niveau de stock dans l'entrepôt	73
Figure 5.8	Planification des activités avec le modèle modifié	74
Figure 5.9	Planification des activités avec le modèle modifié	81
Figure 5.10	Impacts de l'augmentation de coût de commande sur le nombre de commandes	87
Figure 5.11	Impacts de l'augmentation de coût de commande sur le coût total.....	87
Figure 5.12	Impact de l'augmentation de coût de commande sur les différents coûts.....	88
Figure 5.13	Comparaison de nombre de commandes	89
Figure 5.14	Comparaison de coût total	90

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

BIM	Modélisation des données du bâtiment
COA	Algorithme d'optimisation Coyote
CPM	Méthode du chemin critique
CSC	Chaîne d'approvisionnement de la construction
CSCM	Gestion de la Chaîne d'approvisionnement de la construction
DE	Évolution différentielle
GA	Algorithme génétique
GWO	Optimiseur de loup gris
HS	Recherche d'harmonie
MBO	Optimisation des oiseaux migrants
MIP	Programmation mixte en nombres entiers
MILP	Programmation linéaire mixte en nombres entiers
MINLP	Programmation non linéaire mixte en nombres entiers
MOEAD	Algorithme évolutionnaire multi-objectif basé sur la décomposition
MOPSO	Optimisation multi-objectif par essaims de particules
MRCPSP	Problème de planification de projet avec contraintes de ressources multimodes
MRP	Planification des besoins en matériaux
NSGA	Algorithme génétique de tri non dominé
PSMO	Ordonnancement des projets et commande des matériaux
PSO	Optimisation par essaims de particules
RCPSP	Problème de planification de projet avec contraintes de ressources
SA	Simulation de recuit
SPEA	Algorithme évolutionnaire de Pareto de force
VAN	Valeur Actuelle Nette

INTRODUCTION

L'industrie de construction est un poids lourd de l'industrie mondiale, représentant plus de 13% du PIB mondial selon un rapport de McKinsey & Company de 2020 (« How disruption is reshaping construction | McKinsey », 2020). Les biens et services liés à la construction dans le monde représentent des dépenses annuelles de 10 000 milliards de dollars et emploient 7 % de la population active mondiale selon un rapport de McKinsey & Company de 2017 (« Reinventing construction through a productivity revolution | McKinsey », 2017). La construction est aussi un secteur important qui contribue grandement à la croissance économique d'un pays. « En 2020, la Commission de la construction du Québec estimait à 52 milliards de dollars la valeur des dépenses en immobilisations pour la construction au Québec. Cette somme équivalait à environ 14 % du PIB... » (Ministère de l'Économie et de l'Innovation, 2021). « Les matériaux et les produits de construction, des intrants de première importance, alimentent l'industrie de la construction. Les manufacturiers québécois en produisent une vaste gamme pour le marché tant intérieur qu'extérieur. » (Ministère de l'Économie et de l'Innovation, 2021). C'est un secteur offrant 256 000 emplois directs en moyenne par mois, soit 1 emploi sur 20 au Québec, selon la commission de la construction du Québec (Commission de la construction du Québec, 2022).

Cependant, bien qu'elle soit un contributeur important à l'économie et jouant un rôle important dans le développement économique, il s'agit d'un secteur complexe, faisant face à des difficultés et des défis partout dans le monde. Par rapport à des industries telles que l'industrie manufacturière, l'industrie de la construction est très en retard dans l'adoption de nouvelles façons de faire et l'utilisation de technologies numériques. Ceci n'a pas favorisé l'amélioration de la productivité dans ce secteur où les projets de construction dépassent souvent les délais définis en début de projet ainsi que le budget alloué. Cette industrie est en effet très compétitive, elle est caractérisée par un processus particulier et complexe et qui souffre d'une forte fragmentation. Elle a donc un besoin important de gestion efficace de sa chaîne d'approvisionnement.

Les autres secteurs ont amélioré leurs performances de manière significative en mettant en œuvre des chaînes d'approvisionnement plus intégrées et plus efficaces, alors que l'industrie de la construction semble rencontrer des difficultés à mettre en œuvre ces outils. Plusieurs études indiquent que les défis proviennent principalement des différences fondamentales entre ces industries et une grande partie de ces problèmes peut être attribuée aux interfaces complexes entre les différentes parties impliquées dans la chaîne d'approvisionnement de la construction.

Les chaînes d'approvisionnement générales, telles que celle de la fabrication (Figure 1.1), sont basées sur des processus et des relations continus, alors que la chaîne d'approvisionnement de construction (Figure 1.2) implique une multitude d'acteurs, à savoir les entrepreneurs généraux et les sous-entrepreneurs, les professionnels de la construction (architectes, ingénieurs, etc.), les manufacturiers de matériaux de construction et de produits préfabriqués, les grossistes et les distributeurs, etc. La communication et la coordination entre ces différents corps de métiers ne sont pas toujours évidentes. Cette chaîne est fondamentalement différente de la chaîne d'approvisionnement générale. Ainsi, elle ne peut pas être traitée avec une méthode de gestion de chaîne d'approvisionnement typique.

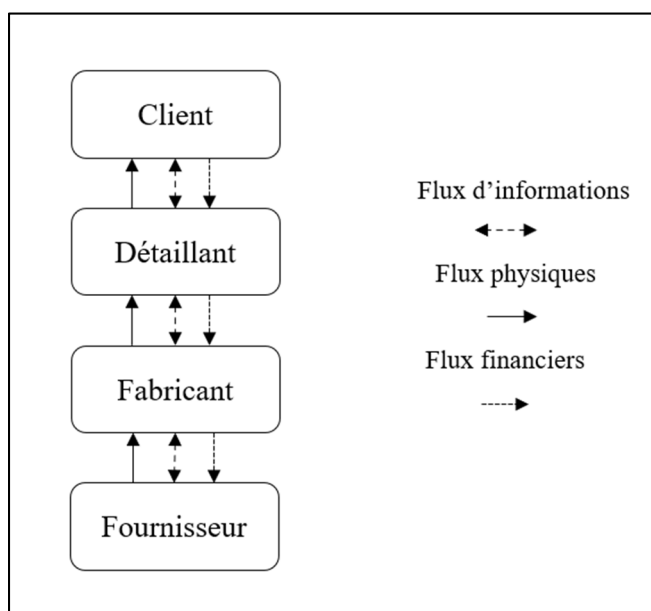


Figure 1.1 Une chaîne d'approvisionnement typique

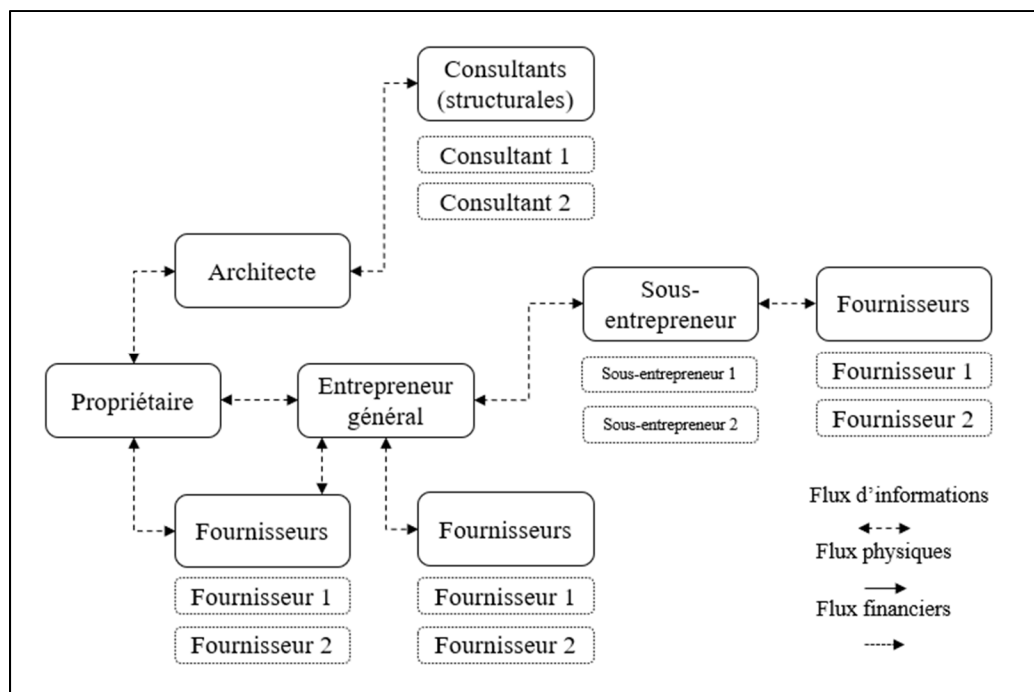


Figure 1.2 Une chaîne d'approvisionnement de construction
Adaptée de Studer & De Brito Mello (2021)

En outre, cette industrie est pleine d'incertitudes et varie beaucoup avec l'environnement. Plusieurs changements dans les plans de construction peuvent y avoir lieu plusieurs fois au cours du projet. Les mauvaises conditions météorologiques peuvent donner lieu à l'arrêt de l'exécution. En particulier, les sites de construction dans les zones urbaines souffrent de la capacité limitée de stockage sur le site. Dans certains cas, de grandes quantités de matériaux de construction sont stockées sur un chantier parce que les entrepreneurs veulent acquérir ces matériaux avant d'en avoir réellement besoin afin d'éviter les retards d'exécution, mais l'inventaire des matériaux entraîne des coûts supplémentaires et cause de graves problèmes de construction, tels que l'encombrement du site ou la dégradation de la qualité des matériaux (Tserng, Yin, & Li, 2006). Dans d'autres cas, le manque d'espace de stockage sur les chantiers ne permet pas la possession de stock requis à l'avance, les commandes pour les chantiers se font donc à la dernière minute ce qui peut retarder l'exécution des activités. Aussi, dans les zones urbaines, le transport des matériaux en chantier est aussi compliqué vu la congestion qui

existe en ville, ce qui peut retarder l'arrivée des matériaux et le début des activités qui requiert ces matériaux.

Par conséquent, des solutions logistiques de construction plus intelligentes et plus sûres sont nécessaires dans les zones urbaines pour des raisons environnementales, sociétales et économiques (Janné et al., 2018).

Toutes ces perturbations et incertitudes montrent que l'industrie de construction a besoin d'une gestion efficace de sa chaîne d'approvisionnement. Le concept de gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM) a été de plus en plus appliqué à de nombreux secteurs industriels pour améliorer les performances des entreprises, telles qu'une réponse plus rapide à la variété des demandes des clients, un coût plus faible et une meilleure qualité. L'importance de la SCM pour améliorer la gestion de la construction est reconnue depuis les années 1990 (Le, Elmughrabi, Dao, & Chaabane, 2020).

La CSCM (Gestion de la Chaîne d'approvisionnement de la construction) est une approche très prometteuse pour réussir l'intégration entre les différentes parties prenantes de la chaîne (Papadopoulos, Zamer, Gayialis, & Tatsiopoulos, 2016). La valeur de l'intégration des entités le long des chaînes d'approvisionnement (SC) a été largement étudiée dans de nombreuses industries et services, sauf dans l'industrie de construction (Golpîra, 2020). Cependant, les projets de construction sont confrontés à de nombreux problèmes en raison du manque de collaboration entre les participants de la SC. Heureusement, au début des années 2000, les chercheurs ont commencé à proposer des perspectives sur l'intégration de la chaîne d'approvisionnement de la construction (Le et al., 2020).

Ensuite, dans l'industrie de construction, il existe deux types de projets, la construction sur site (*on-site construction*) et la construction hors site (*off-site construction*). Dans le contexte de la construction sur site, tous les travaux et les activités de construction sont exécutés sur le site avec la méthode traditionnelle. Par ailleurs, dans le cas où la construction est hors site, les éléments nécessaires à la construction d'un bâtiment sont préfabriqués en usine ou dans tout

autre emplacement différent de leur emplacement d'installation final, puis expédiés sur un site de construction où ils seront assemblés.

Ces éléments peuvent être des composants préfabriqués (par exemple, des poutres, des colonnes, des dalles, des escaliers, etc.), des éléments en panneaux (par exemple, des systèmes de murs, des toits et des planchers) ou des modules volumétriques complets (par exemple, un module de salle de bain, une kitchenette ou un panneau mural), (Hussein, Eltoukhy, Karam, Shaban, & Zayed, 2021). La construction hors site, comme la construction sur site, peut être utilisée à diverses fins, notamment des applications résidentielles, éducatives, de soins de santé et commerciales, industrielles, de travaux publics et institutionnels.

Le secteur de la construction subit actuellement une transition de la construction sur site vers la construction hors site, ou encore vers des systèmes de construction modulaires qui tirent parti des techniques modernes de préfabrication (Hsu, Angeloudis, & Aurisicchio, 2018).

L'utilisation des produits modulaires est devenue de plus en plus populaire dans le monde entier, car il s'agit d'un mode de construction innovant qui permet à la fois d'améliorer la productivité des projets de construction, de respecter l'environnement, de favoriser le développement durable et d'éviter l'encombrement sur les chantiers de construction en procurant les produits modulaires, préfabriqués dans l'usine du fabricant, et en les assemblant une fois arrivés sur le site (Zhang & Cui, 2021), (Hussein et al., 2021).

L'utilisation de modules remplace le processus de construction traditionnel, qui nécessite la coordination sur place de nombreux éléments, processus et professionnels. Les produits modulaires peuvent être particulièrement utiles pour les projets de construction où de nombreux éléments construits sont souvent des répliques exactes les uns des autres.

Cependant, ces produits sont de grande taille et nécessitent aussi de l'espace pour achever l'assemblage et stocker le produit jusqu'à son utilisation. Comme les chantiers de construction

souffrent d'une capacité d'espace limitée, les produits modulaires doivent être commandés en fonction du calendrier du projet de construction correspondant. La construction hors site nécessite donc une planification intégrée et une stratégie d'optimisation de la chaîne d'approvisionnement efficace, qui permet une gestion efficace des stocks afin de réduire les coûts (Hamdan, Barkokebas, Manrique, & Al-Hussein, 2015).

Enfin, un dernier aspect que nous allons prendre en considération dans cette étude est l'utilisation de nouvelles technologies informatiques pour améliorer l'efficacité et la productivité de la construction. En effet, le secteur de la construction souffre d'un manque d'innovation, d'intégration, de collaboration et de partage d'informations, telles que les informations relatives au calendrier des projets de construction, la demande en matériaux pour chaque activité de construction, en plus des informations géométriques et matérielles. Les modèles de planification et d'optimisation logistiques ne sont pas bien adaptés aux développements récents de technologies telles que le BIM (Modélisation des données du bâtiment). À cet égard, l'utilisation des technologies est suggérée pour obtenir de meilleurs processus logistiques. Diverses applications informatiques ont été utilisées dans la littérature comme un moyen d'améliorer le processus d'intégration de la CSCM. Ces dernières années, l'utilisation d'outils basés sur les TI s'est orientée principalement vers le BIM (Papadopoulos et al., 2016). Le BIM fournit des données relatives au calendrier et aux coûts des projets de construction, en plus des informations géométriques et matérielles, et offre la possibilité d'une collaboration et de coordination entre les participants au CSC sur une même plateforme.

Dans cette étude, nous prenons comme hypothèse que le BIM va servir de base de données qui permet d'avoir accès aux informations liées aux différents acteurs de la CSC à l'avance afin de bien planifier les projets et les commandes de matériaux. Cependant, nous n'entrons pas dans les détails de l'utilisation de celui-ci et de la façon d'extraire des données.

Nous allons donc traiter un des éléments de la CSCM qui est la planification intégrée de PSMO dans le contexte de construction hors site, et nous allons nous intéresser au cas des produits modulaires en utilisant l'extraction automatique de données nécessaires pour la planification à

partir du BIM pour permettre la planification et la coordination entre les différentes parties prenantes, afin de réduire le coût global de la chaîne d'approvisionnement de la construction et afin d'éviter les retards dans la livraison des projets.

Le chapitre 1 explique la motivation derrière ce travail, les objectifs de cette étude ainsi que la méthodologie de recherche adoptée. Le chapitre 2 présente une revue de la littérature sur les modèles d'optimisation existants qui traitent le problème PSMO. Le chapitre 3 présente l'énoncé du problème, les hypothèses qui ont été établies pour cette étude, définit la notation et la formulation du modèle d'optimisation proposé. Le chapitre 4 présente le travail de calcul qui a été effectué pour valider le modèle. Le chapitre 5 présente l'heuristique proposée pour résoudre les problèmes de grande taille et présente aussi les modifications apportées au niveau du modèle et au niveau de la décomposition afin de se rapprocher de la solution optimale. Une conclusion sur notre principale contribution et ses limites ainsi que les directions pour les recherches futures seront fournies à la fin.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

1.1 Motivation

La stratégie traditionnelle de planification des projets de construction (Figure 1.1) consiste généralement à traiter séparément l'ordonnancement du projet et la planification des commandes de matériaux (Dodin & Elimam, 2001), (Hassanzadeh, Sheikh Sajadieh, & Shadrokh, 2009), (Najafi, Zoraghi, & Azimi, 2011), (N. Zoraghi, Najafi, & Akhavan Niaki, 2012), (Fu, 2014), (Niaki, Najafi, Zoraghi, & Abbasi, 2015), (Shahsavari, Abbasi, & Zoraghi, 2015), (Babak H. Tabrizi & Ghaderi, 2015a), (B.H. Tabrizi & Ghaderi, 2016), (B.H. Tabrizi & Ghaderi, 2016), (Nima Zoraghi, Shahsavari, Abbasi, & Van Peteghem, 2017), (Babak H. Tabrizi, Ghaderi, & Haji-Yakhchali, 2019), (Habibi, Barzinpour, & Sadjadi, 2019), (Zhang & Cui, 2021). Sur la base de cette stratégie, la planification des activités du projet est exécutée en premier lieu, puis le calendrier de commandes des matériaux est déterminé en conséquence. Le fait de fixer les décisions relatives à la commande des matériaux après la phase de planification du projet peut conduire à des solutions non optimales en termes de temps et de coûts d'exécution. Le calendrier du projet permet de déterminer les besoins en matériaux pour chaque période, et la commande et l'approvisionnement des matériaux influencent la période de début de chaque activité. En suivant cette approche, le chef de projet ne prend pas en compte les différents compromis possibles et l'association entre les coûts d'exécution du projet et les coûts de commande dans le processus de prise de décision. D'où l'intérêt pour l'étude du problème intégré de PSMO.

La planification intégrée de l'ordonnancement des projets et de la commande de matériaux a été de plus en plus abordée au cours des dernières décennies dans la littérature comme une approche visant à améliorer les coûts d'exécution des projets. Cependant, aucune étude n'a pris en considération l'amélioration des performances de toute la chaîne d'approvisionnement de la construction avec l'intégration de plusieurs projets de construction.

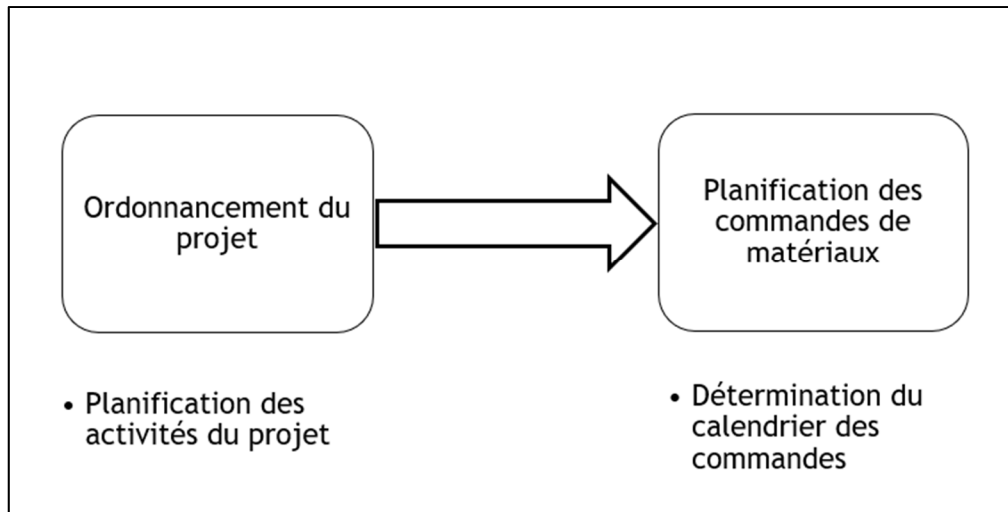


Figure 1.1 Stratégie traditionnelle de gestion des projets de construction

Dans cette étude, par intégration, nous entendons l'intégration de l'ordonnancement des projets et de la commande de matériaux ainsi que l'intégration de la planification pour plusieurs projets de constructions à la fois. Dans le contexte de cette intégration, tous les acteurs de la chaîne d'approvisionnement collaborent les uns avec les autres afin de réduire le coût global de la chaîne.

Récemment, la construction hors site, et plus particulièrement la construction modulaire, est apparue comme une méthode de construction prometteuse dans l'industrie de la construction en raison de son potentiel de réduction des coûts des projets (Lee & Lee, 2021). La construction modulaire consiste à préfabriquer un module de construction hors site, plus particulièrement dans une usine, puis à le livrer sur le chantier où il va être assemblé. Certaines limitations de la modularité sont liées à l'architecture du produit. La construction modulaire implique généralement des composants de construction compliqués, volumétriques et volumineux qui nécessitent une intégration accrue de la chaîne d'approvisionnement afin de surmonter les problèmes dimensionnels associés au transport, au stockage et aux activités d'assemblages des modules sur le site, et pour obtenir un maximum d'avantage de la modularisation (Lee & Lee, 2021), (Ocheoha & Moselhi, 2018).

Il sera donc intéressant de développer un modèle de chaîne d'approvisionnement intégré pour assurer une coordination efficace entre les parties prenantes des projets de construction de la fabrication hors site, la logistique et le processus de construction sur les chantiers, et qui cible particulièrement la construction modulaire afin d'en maximiser les avantages.

1.2 Objectifs

L'objectif de cette recherche est de développer un modèle d'optimisation mathématique pour le problème PSMO pour une CSC intégrée qui s'adapte à la réalité de la planification des projets de construction. Ce modèle démontrera l'efficacité du CSCM (commande des matériaux, planification de la production, planification du transport, gestion des stocks, planification des activités du projet) lorsque les différents membres du CSC collaborent les uns avec les autres.

Les principaux objectifs de cette thèse sont donc:

- 1) Modéliser le CSC intégré en considérant différents entrepreneurs travaillant sur différents sites de construction avec différents projets, un entrepôt et un fabricant de produits modulaires.
- 2) Déterminer quel rôle pourrait jouer la collaboration entre les différents membres dans la réduction des coûts de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement de la construction en présentant une analyse comparative entre une CSC intégrée et une CSC non intégrée.
- 3) Proposer une méthode de résolution qui pourra être utilisée pour résoudre les problèmes de grandes tailles, c'est-à-dire les problèmes avec plusieurs projets de construction et plusieurs activités pour chaque projet.

1.3 Méthodologie

Pour répondre aux objectifs de la recherche de cette étude, les étapes suivantes ont été prises en compte (Figure 1.2) :

1) Revue de la littérature :

La première étape dans ce projet est la phase de revue de la littérature qui traite les problèmes du PSMO pour les projets de construction et proposant une méthode pour déterminer l'ordonnancement des projets ainsi que le plan de commandes de matériaux; plus particulièrement, les études qui proposent un modèle d'optimisation mathématique pour le problème PSMO. Ensuite, une analyse des différents paramètres considérés dans ces modèles, les variables de décision, les éléments de la fonction objectif, les contraintes du modèle, ainsi que les méthodologies adoptées pour résoudre les problèmes étudiés doit être faite. Finalement, une analyse des limitations des différents modèles proposés et les propositions pour les futurs travaux de recherche doivent être effectuées, et le choix du modèle qui servira de base pour le développement du modèle de cette étude doit être fait avant de le développer.

2) Développement du modèle mathématique :

La deuxième étape consiste à identifier les caractéristiques du problème à étudier et la définition des hypothèses pour la modélisation du problème. Ensuite, le modèle mathématique doit être développé et formulé en MILP (Programmation linéaire mixte en nombres entiers) pour l'intégration du PSMO en définissant les indices, les paramètres, les variables de décision, la fonction objectif, ainsi que les contraintes du modèle.

3) Validation du modèle mathématique développé :

Pour valider le modèle mathématique développé, nous allons l'implémenter avec un outil d'optimisation mathématique. Ensuite, la vérification de l'applicabilité du modèle via un exemple numérique présentant une instance de petite taille et l'analyse des résultats obtenus avec l'outil d'optimisation vont être réalisées. Finalement, une comparaison des résultats du

modèle proposé avec les résultats d'un modèle non-intégré doit être effectuée pour démontrer les avantages de l'intégration du PSMO.

4) Proposition d'une méthode de résolution :

La dernière étape de ce projet consiste à proposer une heuristique pour les instances de grande taille qui consiste en une décomposition du problème en deux sous-problèmes de taille plus petite que le modèle initial intégré, et à analyser les résultats de l'exécution des deux, puis à les comparer avec les résultats de la solution optimale, à savoir les résultats du premier modèle intégré, et à évaluer l'écart entre les deux. Ensuite, il faut proposer une méthodologie pour améliorer les résultats obtenus par l'heuristique afin de s'approcher de la solution optimale. Enfin, une analyse de sensibilité de quelques paramètres du problème et l'étude de leurs impacts sur la solution doivent être effectuées.

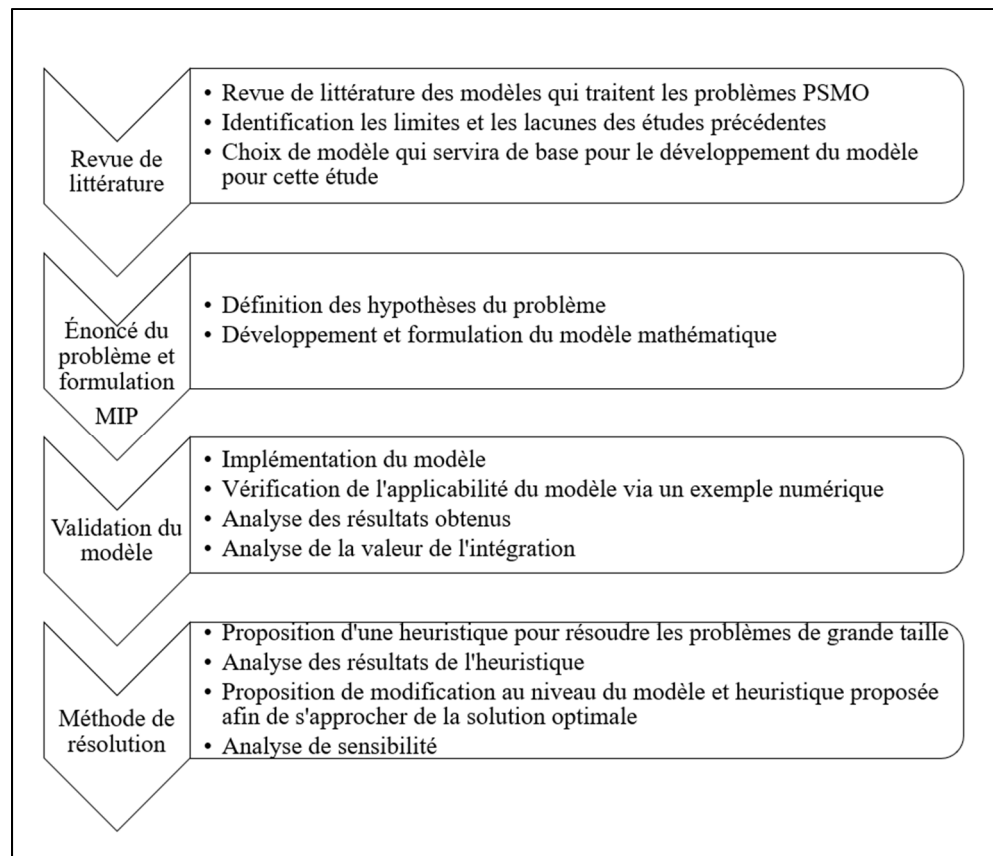


Figure 1.2 Méthodologie de recherche

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Traditionnellement, la gestion des projets de construction consiste généralement à traiter séparément et indépendamment le problème de planification des activités du projet et le problème de la commande des matériaux. Sur la base de cette stratégie de planification traditionnelle, la planification du projet est exécutée en premier lieu, c'est-à-dire, la date de début et de fin de chaque activité est fixée, puis une planification de commande de matériaux est déterminée en conséquence. Cette méthode traditionnelle ne permet pas aux chefs de projets de prendre en considération les différents compromis possibles entre de différents coûts qui pourraient permettre de réduire le coût global du projet. Ces coûts peuvent inclure le coût des ressources renouvelables (la main-d'œuvre, la machinerie, les installations, etc.) et les ressources non renouvelables (les matériaux, les composants, les assemblages, etc.), le coût de la commande, le coût de commande de matériaux différée, le coût de possession de stock, une récompense ou une pénalité pour avoir dépassé le délai d'achèvement du projet, etc.

Par conséquent, ces possibles compromis de coût indiquent que la planification des activités du projet et la planification des commandes de matériaux, en matière de temps et de quantité, sont indissociables et doivent être traitées simultanément, de manière intégrée, afin d'ajouter davantage de réalisme à la planification des projets; également afin d'avoir une bonne coordination entre la commande et l'arrivée de matériaux sur le chantier et le début et l'exécution des activités du projet. Ainsi, il est possible d'éviter les retards sur les chantiers, dus aux délais d'acquisition du matériau ou à la non-disponibilité de matériau requis au moment de l'exécution d'une activité ou à l'encombrement sur les sites, car dans la réalité, l'espace de stockage des matériaux est souvent limité sur de nombreux chantiers de construction, surtout en zone urbaine. Il n'est donc pas possible de stocker le matériau requis pour une activité donnée trop longtemps en avance. De plus, cette stratégie intégrée permettra

d'éviter les coûts qui en découlent, à savoir les coûts de stock, ou la pénalité à payer en cas de dépassement de délais.

Dans cette optique, de nombreux chercheurs ont souligné l'importance d'intégrer le problème de planification des projets et le problème de planification de commandes de matériaux dans l'industrie de la construction. Ce problème est connu dans la littérature sous l'acronyme anglais PSMO (Figure 2.1). Nous allons dans ce qui suit, étudier l'évolution de ce problème dans la littérature. Une des premières études sur l'intégration du problème de l'ordonnancement des projets et de la commande des matériaux pour les ressources non renouvelables a été proposée pendant l'année 1980 (Dodin & Elimam, 2001).

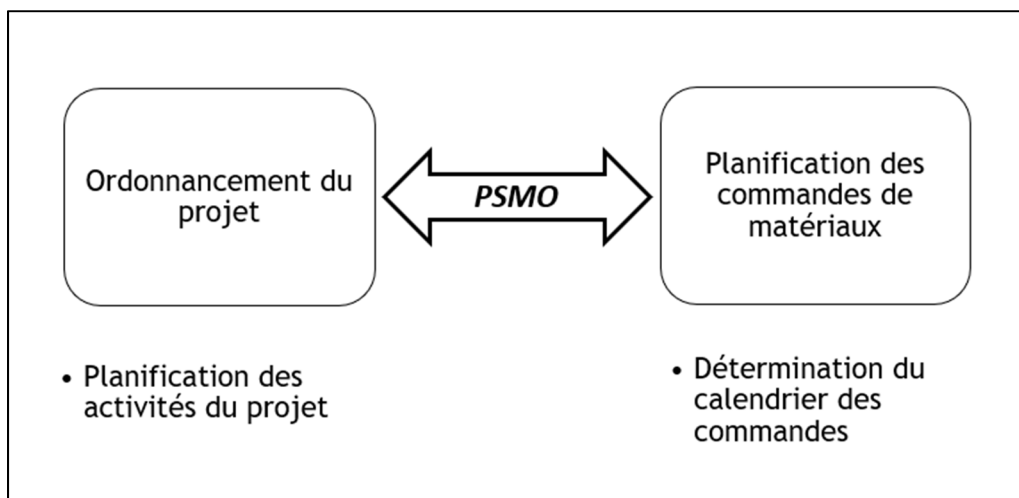


Figure 2.1 Approche intégrée PSMO

2.2 Modèles du problème PSMO

Aquilano & Smith (1980) présentent le travail fondateur sur l'intégration du PSMO. Ils étaient les premiers à introduire le problème intégré de PSMO en développant un modèle hybride combinant la méthode du chemin critique, connu sous l'acronyme anglais CPM (Méthode du chemin critique), avec la planification des besoins en matériaux, connue sous l'acronyme anglais MRP (Planification des besoins en matériaux). Le principal avantage de cette technique

est que les délais d'acquisition des ressources ainsi que les niveaux d'inventaire sont intégrés dans le processus de détermination du calendrier du projet.

Ensuite, Smith-Daniels & Aquilano (1984) ont présenté une amélioration du travail précédent et ils ont étendu le problème en proposant une heuristique d'ordonnancement pour les projets de grande taille, en prenant en compte les contraintes liées à la disponibilité des ressources renouvelables ainsi que les ressources non renouvelables et leurs délais d'acquisition, et les durées des activités avec les contraintes de précédence. Smith-Daniels & Aquilano (1987) ont aussi souligné que la maximisation de la valeur nette du projet est un critère important de sa réussite, et ils ont présenté une procédure de planification de projet en utilisant la méthode du CPM-MRP avec des ressources limitées. Ils ont réussi à avoir une VAN (Valeur Actuelle Nette) plus élevée en choisissant de commencer chaque activité à sa date de début au plus tard, au lieu de commencer chaque activité à sa date de début au plus tôt.

Ensuite, Smith-Daniels & Smith-Daniels (1987b) ont introduit le premier modèle mathématique d'optimisation pour le PSMO et ils l'ont formulé en un modèle MILP qui offre un ordonnancement optimal des activités du projet et des commandes de matériaux, et ayant pour objectif la minimisation du coût total qui comprend le coût de commande, le coût de stock, le coût de tenue des activités achevées ainsi que les pénalités dues aux retards dans les projets. Ils ont montré qu'une solution optimale du problème peut être obtenue si chaque activité commence à sa période de début au plus tard. Ils ont également montré que le problème peut être résolu avec une solution optimale lorsqu'il est décomposé en une dérivation de la planification du projet et une dérivation du plan de commande des matériaux. Ils ont utilisé un algorithme de taille de lot économique pour trouver, pour une planification de projet donné, le plan de commande optimal de chacun des matériaux. Cet algorithme a été proposé plus tôt dans la littérature par Wagner & Whitin (1958). Smith-Daniels & Smith-Daniels (1987b) ont mentionné que les contraintes des ressources renouvelables, contrairement aux ressources non renouvelables, ont été bien étudiées dans la littérature avec le problème de l'ordonnancement des projets avec les contraintes de ressources, connu sous l'acronyme anglais RCPSP (Problème de planification de projet avec contraintes de ressources), d'où leur intérêt à étudier

l'intégration et les effets de contraintes des ressources non renouvelables sur la planification et le coût des projets.

Dans une autre étude, Smith-Daniels & Smith-Daniels (1987a) ont proposé une nouvelle approche du problème d'ordonnancement des projets en prenant en compte les contraintes liées aux matériaux ainsi que les contraintes liées au budget, et en ayant comme objectif principal la maximisation de la VAN du projet, qu'ils considèrent comme une mesure de performance importante dans les projets de longue durée.

L'objectif de toutes les études mentionnées ci-dessus est principalement la minimisation des coûts de passation de commandes, des coûts de possession de stock, des coûts de la tenue des activités achevées ainsi que des pénalités dues aux retards des chantiers, sans prendre en compte d'autres termes de coûts qui peuvent donner plus de possibilités de compromis et donc minimiser davantage les coûts. Puis, l'objectif de ces études est l'optimisation de la planification des projets, en supposant que la durée des activités est constante, ce qui ne donne pas de flexibilité au niveau de la planification des activités et ce qui ne reflète pas beaucoup la réalité d'exécution des projets de construction.

Par conséquent, Dodin & Elimam (2001) ont étendu le problème de PSMO pour prendre en compte d'autres facteurs susceptibles de réduire le coût total du projet, en incluant la compression des activités, c'est-à-dire afin de permettre aux durées des activités de varier entre leurs temps normaux (*Normal time*) et le temps de compression (*Crash time*). La compression des durées des activités lorsqu'elle est possible engendre une augmentation des coûts liés à la compression, qui peut se traduire comme coût d'ajout d'une ressource renouvelable pour chaque période afin d'exécuter l'activité plus rapidement. Des récompenses variables en fonction de la valeur du projet pour un achèvement plus tôt que la date d'échéance, ainsi que des escomptes sur la quantité de matériaux achetés afin de minimiser les coûts totaux, sont aussi considérées. Ils ont étudié l'impact de ces facteurs sur le calendrier du projet et les commandes de matériaux. Finalement, ils ont réussi à montrer que la durée variable d'une activité causée par la compression offre davantage de flexibilité à la planification du projet, ce

qui entraîne une réduction des coûts plus importante et ce qui permet de réaliser des économies sur les activités achevées ainsi que le coût de commande des matériaux. Ils ont démontré que chacun des ajouts, la durée d'activité variable, les escomptes, les pénalités ou les récompenses, ajoutés individuellement ou collectivement, mènent à une réduction supplémentaire dans la valeur de la fonction objective. Ils ont formulé le problème comme un modèle de programmation mixte en nombres entiers MILP. Ensuite, ils ont utilisé certains résultats analytiques pour réduire la taille du modèle et améliorer l'efficacité de sa solution. Cependant, leur expérience a montré que la structure et la taille du réseau affectaient fortement le temps de calcul. Par conséquent, leur recherche numérique s'est limitée aux problèmes comportant 30 activités au maximum.

Pour approfondir leurs travaux précédents, Dodin & Elimam (2008) ont fourni un modèle qui prend en compte l'impact de l'utilisation d'équipements spéciaux et coûteux sur le coût et le calendrier du projet. Cependant, ils n'ont pas pris en compte les ressources non renouvelables. Ils ont mentionné que l'intégration de l'ordonnancement du projet à la planification des équipements spéciaux introduit de nouveaux compromis qui permettraient d'établir des calendriers de projet plus réalistes et plus rentables. Une heuristique efficace a été également développée et utilisée pour planifier les projets de grande taille.

Hassanzadeh, Sheikh Sajadieh, & Shadrokh (2009) ont également traité le problème combiné de l'ordonnancement des projets et de la commande des matériaux pour les projets de construction, en proposant un modèle MIP (Programmation mixte en nombres entiers). Il s'agit d'une extension du problème PSMO étudié par Dodin & Elimam (2001). Dans ce modèle, ils ont pris en compte la compression des activités ainsi que les escomptes sur les quantités de matériaux. Cependant, les ressources renouvelables qui déterminent principalement le calendrier du projet ne sont pas prises en compte et la pénurie des ressources non renouvelables n'est pas autorisée. Ils ont développé une approche se basant sur un algorithme génétique (GA) pour trouver la solution optimale aux problèmes de grande échelle. L'objectif est de minimiser le coût total de ce problème en déterminant les valeurs optimales de la durée et de la période de fin de chaque activité, du calendrier de commande des matériaux et du niveau de stock. Des

résultats numériques et une analyse paramétrique ont été présentés pour évaluer la performance de l'algorithme avec plusieurs instances. Les résultats de la comparaison entre les solutions optimales obtenues par LINGO et les solutions proposées par le GA ont également été présentés, et ils ont pu conclure que les résultats du GA étaient meilleurs en matière de temps de résolution. Les directions proposées pour les travaux futurs incluent une extension de cette étude avec des délais d'approvisionnement stochastiques dans lesquels la fonction objectif consiste à minimiser le coût total prévu par période. La prise en compte d'autres politiques d'escompte peut également être considérée comme une extension de cette étude.

Dans le dernier travail cité, l'algorithme génétique proposé pour résoudre le problème PS MO a été développé de telle sorte que le calendrier de commande des matériaux serait déterminé pour chaque activité séparément, ce qui ne donne pas des résultats très optimaux.

Dans l'article de Najafi, Zoraghi, & Azimi (2011), le problème PS MO est étendu de telle sorte que les délais de commande des matériaux sont déterminés de manière globale, en tenant compte de toutes les exigences de l'activité. L'approche adoptée réduit le coût total de manière significative. Dans ce modèle, ils ont tenu compte des coûts de possession des stocks et des coûts de commande. Le modèle a été formulé en MIP. Hassanzadeh et al. (2009) ont montré que le PS MO appartient à la classe des problèmes NP-difficiles et ce modèle est une généralisation du problème PS MO, donc il est également NP-difficile. Ainsi, une métaheuristique a été proposée pour le résoudre, et a été testée analytiquement pour montrer son efficacité, en particulier pour les problèmes à grande échelle. Il s'agit d'un algorithme hybride qui se compose de deux boucles. Dans la première boucle, le SA (Simulation de recuit) tente de trouver un calendrier pour les activités. Dans la deuxième boucle, un GA est utilisé pour trouver la meilleure politique de commande des matériaux pour le calendrier d'activités trouvé, de sorte que les coûts totaux de possession et de commande des matériaux soient minimaux.

N. Zoraghi, Najafi, & Akhavan Niaki (2012) ont aussi étudié une extension de PS MO de Dodin & Elimam (2001). Le problème est d'abord modélisé mathématiquement et formulé en MIP. Il

a comme objectif la minimisation des coûts totaux de stockage et de commande de matériaux, en déterminant la date de début des activités ainsi que les calendriers de commandes. Ensuite, une combinaison du SA et d'un GA a été proposée pour le résoudre. La méthode de Taguchi a été utilisée pour régler les paramètres de l'algorithme proposé, qui a été testé sur de nombreuses instances de problèmes dont les modèles mathématiques ont été résolus par LINGO à des fins de comparaison. La méthode Taguchi est une méthode statistique pour réaliser des plans d'expériences. Les résultats de l'étude comparative ont montré que la méthode proposée fournit des solutions aussi bonnes que celles obtenues par LINGO, tout en prenant moins de temps pour la résolution que LINGO. De plus, alors qu'il existait de nombreuses instances pour lesquelles LINGO n'était pas capable d'atteindre la solution optimale en 3600 secondes, l'algorithme hybride proposé a été capable de les résoudre.

Fu (2014) a présenté une autre étude intéressante dans la littérature liée au problème PSMO, où le problème multimode ainsi que les contraintes liées aux ressources renouvelables et aux ressources non renouvelables ont été incorporés à l'ordonnancement d'un projet de construction et à la commande de lots de matériaux. Ce problème est appelé MRCPSP (Problème de planification de projet avec contraintes de ressources multimodes). Dans un problème multimode, le choix du mode détermine la demande de ressources renouvelables ainsi que les ressources non renouvelables, qui correspondent également à la durée de l'activité. Le problème a été formulé comme un modèle de programmation mixte en nombres entiers, dont l'objectif est d'aider les gestionnaires de projet à envisager divers compromis entre plusieurs coûts, tel que le coût des ressources renouvelables, le prix des matériaux, le coût de la commande, le coût de la commande en souffrance, le coût de possession des stocks, ainsi qu'une récompense, ou pénalité, pour l'achèvement avancé ou tardif du projet. Les commandes en souffrance sont autorisées pour compenser les écarts de quantité résultant de la commande par lots. Il étend les recherches précédentes, notamment celles de Dodin & Elimam (2001), pour couvrir l'exécution multimode des activités. De plus, un algorithme hybride combinant une HS (Recherche d'harmonie) et un GA, a été proposé en conséquence pour trouver des solutions proches de la solution optimale. Plusieurs instances de projet ont été fournies avec différentes structures de réseau et avec différentes réalisations pour évaluer la performance de

l'algorithme et du modèle, et afin de discuter les facteurs sur le coût total. Ils ont mentionné que pour les recherches futures, le délai ou les escomptes pour les commandes dans le modèle doivent être autorisés, et une des directions de recherche consiste à étendre cette étude pour prendre en compte des durées d'activités et des délais d'approvisionnement stochastiques en tenant compte de l'incertitude.

Niaki, Najafi, Zoraghi, & Abbasi (2015) ont étudié le même problème que N. Zoraghi et al. (2012) et Najafi et al. (2011). Ils ont considéré en plus les contraintes sur la disponibilité des ressources renouvelables. Le PSMO sous contrainte de ressources, qui a été peu étudié dans la littérature, intègre le problème d'ordonnancement de projet sous contrainte de ressources renouvelables RCPSP et le problème de commande de matériaux MO. Une métaheuristique combinant le SA et le GA a été proposée pour résoudre le problème. Shahsavar, Abbasi, & Zoraghi (2015) ont également étudié le même problème, mais en considérant en plus l'impact des politiques d'escompte de quantité des fournisseurs sur le calendrier du projet. Une variable de décision pour le niveau requis de la ressource renouvelable a été ajoutée, et le coût d'emploi des ressources renouvelables a été inclus dans la fonction objectif. Ils ont appelé ce problème RIPMO, pour problème d'investissement dans les ressources RIP, et le problème de commande de matériaux MO. Un algorithme hybride, combinant un GA pour chercher les calendriers et un PSO (Optimisation par essaims de particules) pour parcourir les plans de commande, a été conçu pour résoudre le modèle.

Babak H. Tabrizi & Ghaderi (2015b) ont présenté un modèle qui ressemble beaucoup aux modèles de Dodin & Elimam (2001) et Hassanzadeh et al. (2009). Ils ont pris en compte la durée d'activité comme une variable de décision, ainsi que le coût de compression des activités et la récompense ou pénalité liée à l'achèvement du projet au niveau de la fonction objectif. Ils ont pris en compte en plus les contraintes de capacité de stockage des matériaux sur le site. Ils ont présenté un MILP pour modéliser le PSMO pour la minimisation des coûts totaux liés au crash, à la date d'échéance du projet, à la valeur des activités, aux matériaux (commande, achat et inventaire). Finalement, le logiciel GAMS 22.1 a été utilisé pour résoudre les instances du problème pour des projets de petite taille (au maximum 20 activités). Babak H. Tabrizi &

Ghaderi (2015a) ont fourni un modèle mathématique bi-objectif pour traiter le problème PSMO, qui minimise le coût du projet et maximise la robustesse du calendrier. Ensuite, la méthode e-contrainte a été utilisée comme méthode de résolution. B.H. Tabrizi & Ghaderi (2016) ont développé un modèle pour le problème PSMO visant à augmenter la VAN du projet. De plus, la notion d'escompte de quantité a été formulée pour plusieurs fournisseurs afin d'améliorer la prise de décision en matière d'approvisionnement en matériaux. Ils ont développé une version améliorée du GA pour résoudre le modèle.

Les travaux de recherche mentionnés ci-dessous essayaient de se rapprocher de la réalité des projets de construction en développant à chaque fois les travaux précédents et en prenant en compte de nouveaux paramètres. Cependant, tous les travaux ont été étudiés dans des environnements déterministes, aucune de ces études n'a pris en considération certaines incertitudes pouvant avoir un impact significatif sur les coûts et le temps d'exécution des projets.

Par conséquent, certaines études se sont intéressées à cet aspect et ont inclus certaines incertitudes dans leurs modèles. Babak H. Tabrizi & Ghaderi (2016) ont abordé le problème PSMO avec l'objectif de minimiser le coût total d'exécution tout en maximisant la robustesse du calendrier, mesurée par la marge pondérée, en proposant un modèle mathématique MILP robuste. Le modèle proposé prend en compte la question de l'incertitude de deux points de vue différents, l'une liée à la durée des activités, et l'autre liée aux coûts des ressources. Dans cette étude, ils ont à la fois considéré les ressources renouvelables et les ressources non renouvelables. La disponibilité des ressources renouvelables a été considérée comme variable de décision. La formulation proposée a pris en compte la possibilité de procurer les matériaux requis auprès de différents fournisseurs proposant une opportunité d'escompte spécifique pour toutes les unités. Pour traiter ce problème NP-difficile, une métaheuristique combinant un algorithme génétique appelé NSGA-II (Algorithme génétique de tri non dominé), et une version modifiée de l'algorithme DE (Évolution différentielle), a été appliquée comme méthodologie de résolution. De plus, les facteurs principaux ont été calibrés par la méthode de Taguchi afin d'assurer la robustesse des résultats obtenus. Ensuite, les performances des

méthodes de résolution proposées ont été comparées en fonction d'un ensemble varié d'instances afin de tester leurs applicabilités et leurs efficacités par rapport à la méthode exacte e-contrainte. Ces métaheuristiques ont été prouvées comme étant efficaces pour résoudre le modèle, en particulier pour les instances de grande taille.

Nima Zoraghi, Shahsavar, Abbasi, & Van Peteghem (2017) ont développé un modèle pour le problème PSMO multimode, qui inclut également une politique de récompense/pénalité pour l'achèvement du projet afin d'atteindre un plus haut degré de réalisme. Ce problème appartient à la famille des problèmes MRCPSP. Ils ont également présenté trois algorithmes métaheuristiques hybrides pour trouver des solutions quasi optimales au problème. Tous ces algorithmes se composent de deux niveaux d'optimisation : un niveau de recherche externe et un niveau de recherche interne. Les algorithmes ne diffèrent que par leur niveau de recherche externe, dans lequel le meilleur calendrier des activités du projet et l'affectation du mode d'exécution sont recherchés. Lorsqu'une nouvelle affectation de mode et un nouveau calendrier sont trouvés, le deuxième niveau est appelé pour trouver la meilleure politique d'ordonnancement. Tous les algorithmes utilisent la même recherche interne. Dans la recherche externe, trois algorithmes sont développés : PSO, SA et GA, et dans la recherche interne, un GA est utilisé. En outre, la méthode de Taguchi a été utilisée pour calibrer les paramètres des algorithmes. Les résultats ont été comparés aux solutions exactes obtenues par LINGO, et également entre eux, afin de trouver la meilleure procédure. Le PSO a surpassé les deux autres algorithmes dans les deux comparaisons.

N. Zoraghi, Shahsavar, & Niaki (2017) ont proposé une nouvelle combinaison du problème PSMO en multimode MRCPS, dans laquelle le but est de trouver une frontière Pareto optimale pour un modèle à triple objectif. Le premier objectif est de minimiser le délai d'exécution du projet, le deuxième objectif est de maximiser la robustesse du calendrier du projet, et le troisième objectif est de minimiser les coûts totaux du projet en se rapportant aux ressources renouvelables et non renouvelables impliquées dans le projet. L'approvisionnement de matériaux est exposé à la politique d'escompte sur la quantité totale afin d'atteindre un plus haut degré de réalisme. Le problème a été appelé MRIPQDPMO pour le problème

d'investissement dans les ressources multimodes MRIP et le problème de la commande de matériaux avec escompte sur la quantité QDPMO. Il a été formulé en MINLP (Programmation non linéaire mixte en nombres entiers). Pour obtenir des solutions efficaces, quatre algorithmes évolutionnaires multi-objectifs bien connus ont été adoptés, notamment l'algorithme génétique NSGA-II, l'algorithme évolutionnaire SPEA-II (Algorithme évolutionnaire de Pareto de force), l'optimisation MOPSO (Optimisation multi-objectif par essaims de particules), et l'algorithme évolutionnaire MOEAD (Algorithme évolutionnaire multi-objectif basé sur la décomposition). Les résultats de l'expérimentation et du calcul ont été analysés. Les comparaisons ont montré que NSGA-II a obtenu de meilleures performances dans 4 des 5 métriques utilisées pour la comparaison, tandis que MOPSO a mieux fonctionné dans la dernière métrique.

Certaines études ont impliqué dans l'étude du PSMO le développement durable, l'un des piliers clés du 21^e siècle. Dans cette perspective, Babak H. Tabrizi (2018) a mené une étude sur le PSMO en proposant un modèle bi-objectif pour la minimisation des coûts totaux du projet et des impacts environnementaux. La formulation proposée a pris en compte la possibilité de procurer les matériaux requis auprès de différents fournisseurs. Ils ont discuté des stratégies d'escompte sur la quantité totale ainsi que les escomptes incrémentiels. En outre, le niveau requis de ressources renouvelables a été traité comme une variable décision. Pour résoudre le modèle, une métaheuristique incluant le NSGA-II et MBO (Optimisation des oiseaux migrants) a été utilisée.

Babak H. Tabrizi, Ghaderi, & Haji-Yakhchali (2019) ont étudié le problème PSMO avec la présence de fournisseurs multiples. Le calendrier des activités du projet, le plan de commande des matériaux (temps et quantité) et la sélection des fournisseurs ont été déterminés par leurs modèles qui visent à maximiser la VAN en tenant compte de l'escompte sur la quantité. Un GA a été développé pour résoudre le problème, dont les facteurs clés ont été calibrés par la méthode Taguchi afin d'obtenir des solutions robustes. Le calibrage a été effectué pour des problèmes de différentes tailles afin de fournir le plus de précision possible. Finalement, la performance de la méthode proposée a été testée par rapport aux résultats obtenus par le logiciel GAMS et elle s'est avérée assez efficace.

Habibi, Barzinpour, & Sadjadi (2019) ont abordé le problème PSMO en appliquant un modèle mathématique dans une étude de cas en Iran. Leur travail fournit un cadre intégré pour le problème PSMO avec des considérations de développement durable, qui consiste en deux phases : (a) la quantification des mérites environnementaux et sociaux des fournisseurs potentiels des ressources du projet, et (b) le développement et la résolution d'un modèle mathématique basé sur les données acquises. Leur modèle est capable de déterminer le calendrier des activités, le temps et la quantité de commandes des matériaux et la sélection des fournisseurs qui maximisent la VAN du projet ainsi que les avantages environnementaux et sociaux de ses fournisseurs. Le modèle présenté appartient à la classe des problèmes NP-difficile, par conséquent, les deux algorithmes métaheuristiques multi-objectifs, NSGA-II et MOPSO, ont été modifiés pour servir de méthodes de résolution du modèle. Pour les petits problèmes, les performances de ces méthodes ont été comparées à celles de la deuxième version de la méthode du e-contrainte augmentée (AUGMECON2) ; mais pour les problèmes de taille plus importante, où la méthode exacte n'a pas pu produire une solution dans un temps raisonnable, ces deux algorithmes ont été comparés entre eux. Les résultats ont montré que, quelle que soit la taille du problème, NSGA-II surpasse MOPSO dans la majorité des paramètres d'évaluation. L'étude de cas a été menée dans le projet de construction d'une voie ferrée en Iran, ce qui démontre l'applicabilité du modèle proposé et fournit un exemple illustratif de sa mise en œuvre.

Akhbari (2020) a développé un MIP pour le problème de l'intégration de commandes de matériaux et du MRCPSP avec les politiques de récompense/ pénalité et les politiques d'escompte sur la quantité des matériaux, en considérant la minimisation du coût total du projet comme objectif principal. Ils ont appelé ce problème MRCPS- QDPMO. Ils ont découvert qu'une propriété importante de la solution optimale est le fait que les périodes de début des activités constituent le seul choix pour les points de commande. Cette propriété réduit considérablement l'espace de recherche par rapport aux études précédentes. Ensuite, quatre algorithmes métaheuristiques hybrides appelés COA-GA (Algorithme d'optimisation Coyote), GWO-GA (Optimiseur de loup gris), PSO-GA et GA-GA, ont été développés pour résoudre le

problème. Chacun des algorithmes proposés comprend des composantes de recherche externe et interne, qui déterminent respectivement le meilleur calendrier et le meilleur plan d'approvisionnement en matériaux. Ensuite, le modèle est également résolu à l'aide du solveur BARON dans GAMS, et les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus à partir des algorithmes hybrides. COA-GA et GWO-GA ont surperformé BARON de manière significative. Enfin, les résultats montrent que l'algorithme COA-GA est plus performant que les autres.

Dans la réalité de la plupart des projets de construction, les calendriers des projets peuvent être affectés par diverses incertitudes, telles que les pannes ou les retards d'installation des équipements, les retards de livraison des matériaux, les pénuries imprévues de main-d'œuvre, les conditions météorologiques imprévisibles, etc. Dans ce contexte, Zhang, Cui, Hu, & Hu (2020) se sont basés sur l'étude de Smith-Daniels & Smith-Daniels (1987b) pour développer un MIP pour le problème PSMO avec des incertitudes au niveau des durées des activités. Une approche d'optimisation en deux étapes a été proposée pour améliorer la robustesse de l'ordonnancement afin de faire face aux incertitudes de la durée des activités. La première étape consiste à proposer un MIP sans prendre en considération les incertitudes, et un GA adapté a été utilisé pour résoudre ce problème. La deuxième étape consiste à développer une méthode pour le PSMO robuste afin de construire un calendrier proactif sur la base du calendrier de base généré par le modèle déterministe donné. Dans cette méthode, un nouvel indice mesurant le risque de retard des activités a été proposé. L'analyse des résultats obtenus démontre l'efficacité de la solution proposée dans la réduction du coût total et l'amélioration de la robustesse du calendrier du projet dans la présence des incertitudes liées à la durée des activités.

En outre, étant donné que l'espace de stockage des matériaux est souvent limité dans la réalité de nombreux chantiers de construction, Zhang & Cui (2021) ont proposé un modèle d'optimisation bi-objectif pour le problème PSMO, en considérant un espace de stockage limité pour chaque type de matériaux. Le modèle est capable de déterminer le calendrier des activités ainsi que le temps et la quantité de commandes des matériaux, en minimisant la durée du projet et les coûts correspondants, y compris le coût du stock de matériaux, le coût de commande et

le coût indirect. L'algorithme NSGA-II, réglé par la méthode Taguchi, est proposé comme méthodologie de résolution. En outre, après la validation de l'efficacité et de la convergence du NSGA-II, des expériences de calcul sont menées pour démontrer les effets du coût unitaire et de l'espace de stockage sur la frontière de Pareto.

Récemment, Patoghi & Mousavi (2021) ont proposé un nouveau modèle mathématique pour la combinaison du problème de l'intégration de commandes de matériaux et du MRCPSPP dans un contexte où les activités sont exécutées et réparties sur plusieurs sites. Le modèle développé vise à minimiser le coût total du projet ainsi que le temps d'achèvement du projet. Dans le modèle proposé, le temps de transport est crucial et dépend du site auquel les activités sont assignées. Compte tenu des incertitudes inhérentes à la gestion de projet, la durée des activités, le temps de transport entre les sites et le délai d'exécution sont considérés comme des nombres flous triangulaires à valeur d'intervalle. Ensuite, une nouvelle approche hybride multi-objectifs de l'incertitude est présentée pour traiter le modèle mathématique. Les résultats obtenus de la résolution du modèle à l'aide d'un exemple d'application et d'une étude de cas réelle sur les systèmes de prise d'eau de mer sont évalués.

Le Tableau 2.1 résume les différents objectifs étudiés dans les modèles discutés ci-dessous ainsi que les méthodes de résolutions adoptées. Nous trouvons des objectifs liés aux coûts, à la robustesse du calendrier, à la durée totale du projet, à l'impact environnemental ainsi qu'à l'impact social. Pour les méthodes de résolution, il est remarquable que la plupart des études aient eu recours à des heuristiques et métaheuristiques, sachant que le problème est considéré comme un problème NP-difficile.

Tableau 2.1 Fonction objectif et méthodes de résolution dans la littérature pour le PSMO

	Min. des coûts	Min. Durée totale de l'exécution	Max. Robustesse du calendrier	Min. Impact environnemental	Max. Avantage social	Méthode de résolution
(Smith-Daniels et Smith-Daniels 1987b)	x					Décomposition
(Smith-Daniels et Smith-Daniels 1987a)	x					Méthode exacte
(Dodin et Elimam 2001)	x					Méthode exacte
(Hassanzadeh, Sheikh Sajadieh, et Shadrokh 2009)	x					GA
(Najafi, Zoraghi, et Azimi 2011)	x					SA-GA
(N. Zoraghi, Najafi, et Akhavan Niaki 2012)	x					SA-GA
(Fu 2014)	x					HS-GA
(Niaki et al. 2015)	x					GA-GA, SA-GA
(Shahsavar, Abbasi, et Zoraghi 2015)	x					GA-PSO
(Babak H. Tabrizi et Ghaderi 2015b)	x					Méthode exacte
(Babak H. Tabrizi et Ghaderi 2015a)	x		x			E-contrainte
(B.H. Tabrizi et Ghaderi 2016)	x					GA
(Babak H. Tabrizi et Ghaderi 2016)	x		x			NSGA-II & DE
(Nima Zoraghi et al. 2017)	x					PSO-GA, SA-GA, GA-GA
(N. Zoraghi, Shahsavar, et Niaki 2017)	x	x	x			NSGA-II, SPEAII, MOPSO, MOEAD
(Babak H. Tabrizi 2018)	x			x		NSGA-II, MBO
(Babak H. Tabrizi et al. 2019)	x					GA
(Habibi, Barzinpour, et Sadjadi 2019)	x			x	x	NSGA-II, MOPSO, E-contrainte (AUGMECON2)
(Akhbari 2020)	x					COA-GA, GWO-GA, PSO-GA, GA-GA
(Zhang et al. 2020)	x					GA
(Zhang et Cui 2021)	x	x				NSGA-II
(Patoghi et Mousavi 2021)	x	x				Méthode exacte
Cette étude	x					Méthode exacte & Décomposition

2.3 Limites des travaux actuels

Depuis l'année 1980, plusieurs études ont été menées dans le domaine des problèmes PSMO. La revue de tous les articles trouvés et publiés de l'année 1980 jusqu'à l'année 2021 a été réalisée. La Figure 2.1 montre le nombre de chaque article revu par année de publication. La revue de 22 articles sur le problème PSMO a été effectuée.

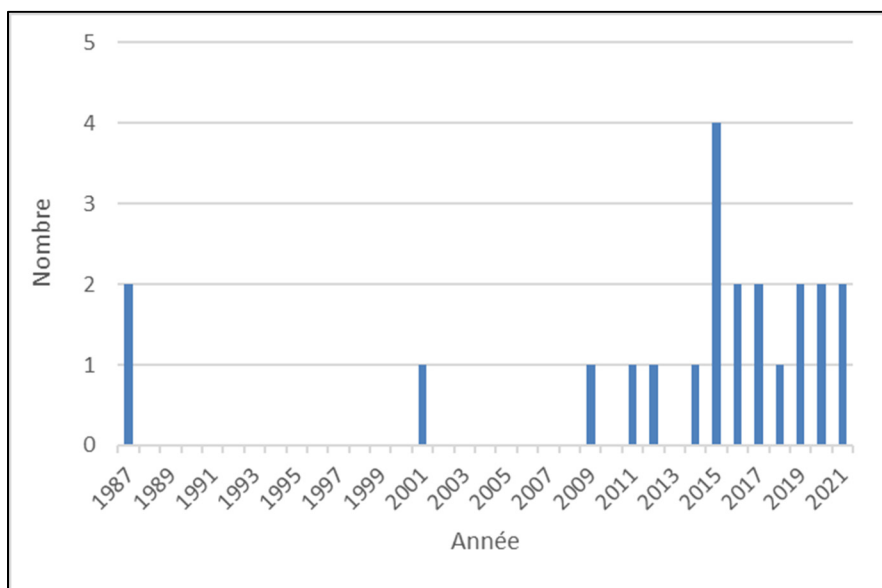


Figure 2.2 Nombre d'articles par année de publication

Pour positionner notre modèle dans la littérature et le comparer aux modèles existants, nous proposons les trois tableaux dans les annexes (voir ANNEXE I à III). Ils résument les études précédentes et comparent le problème étudié dans le cadre de ce projet avec les articles récents de la littérature connexe, en se basant sur les différentes caractéristiques étudiées.

Le premier tableau (ANNEXE I) compare les différentes variables de décisions prises en compte dans les différentes études. Bien évidemment, tant que ces études traitent tout le PSMO, il faut avoir au moins les deux variables de décisions binaires liées au début ou fin de chaque activité et le point de commande de chaque matériau. Peu nombreux sont les études n'ayant pas considéré la quantité de commande par période et le niveau de stock pour chaque

période comme variable de décision. Ensuite, seuls les modèles de Dodin & Elimam (2001), Hassanzadeh et al. (2009) et Babak H. Tabrizi & Ghaderi (2015b) ont considéré la durée de l'activité comme variable de décision pouvant varier entre son temps normal et son temps de compression. Plusieurs autres variables ont été prises en compte dans ces modèles, principalement la variable binaire liée à la sélection des fournisseurs, pour les modèles où l'escompte sur la quantité est pris en considération. Puis, certains ont considéré une variable liée à la disponibilité des ressources renouvelables pour les problèmes qui ont intégré le problème RCPSP avec le problème PSMO. Enfin, quelques études ont considéré une variable pour évaluer la valeur de l'activité achevée ou du projet à la fin de chaque période.

Aucune étude n'a pris en compte une variable de décision sur le plan de production ou le plan de distribution en matière de temps ou de quantités. Dans la plupart des projets de construction, les chantiers nécessitent divers matériaux fournis par le même fabricant, qui a souvent une capacité limitée. En même temps, la date de début de chaque activité dépend de la disponibilité du matériel sur les chantiers. Par conséquent, la planification de la production des matériaux et de leur distribution doit être étudiée simultanément avec la planification des activités.

Le deuxième tableau (ANNEXE II) compare les études en matière de caractéristiques de modélisation. Bien évidemment, toutes les études ont considéré les ressources non renouvelables, comme nous traitons le problème de commandes de matériaux qui sont les ressources non renouvelables. Certaines études ont considéré, outre les ressources non renouvelables, les ressources renouvelables, afin de planifier aussi l'utilisation des ressources sur les chantiers en fonction de la période de début des activités et de l'arrivée des commandes. Des études ont pris en compte des escomptes sur la quantité des matériaux commandés et le délai d'acquisition des matériaux. Ensuite, il y a des modèles qui ont pris en compte l'aspect multimodes de l'exécution des activités, la possibilité de se procurer des matériaux de différents fournisseurs, un modèle multi-objectif, etc. Cependant, aucune étude n'a pris en compte l'aspect multi-sites ni l'aspect multi-échelon. Une seule étude, celle de Patoghi & Mousavi (2021), a considéré l'aspect multi-sites ; il s'agissait par contre d'un seul projet avec des activités réparties sur plusieurs sites, et non pas plusieurs projets différents. Finalement,

seuls Babak H. Tabrizi & Ghaderi (2015b) ont pris en considération une capacité de stockage limité, ce qui reflète le mieux la réalité des projets de construction.

Le dernier tableau (ANNEXE III) montre les différents termes des fonctions objectifs des modèles étudiés. Tous les modèles ont pris en compte les coûts de commandes et les coûts de stock.

Pour conclure, les contributions notables du présent travail par rapport aux travaux similaires sont les suivantes :

- 1) Le modèle mathématique développé pour le PSMO permet aux décideurs d'envisager divers compromis entre les coûts et le temps d'exécution des projets dans une chaîne d'approvisionnement, composée d'un fabricant, d'un entrepôt et de plusieurs projets. Il étudie la planification des commandes et de la production, le transport et le contrôle des niveaux des stocks ainsi que l'ordonnancement du projet, avec l'objectif de minimiser les coûts globaux de l'ensemble de la CSC. Ce modèle permet au fabricant de planifier efficacement la production en effectuant une agrégation des commandes grâce à l'intégration et à la distribution des produits requis pour les différents projets avec une économie d'échelle, et simultanément, les gestionnaires de projets sont en mesure de planifier les projets de construction en évitant les retards et les coûts supplémentaires liés au stockage, à la pénurie ou aux délais d'exécution.
- 2) La formulation du problème avec certaines hypothèses réalistes telles que des sites de construction multiples, une durée d'activité variable et des récompenses/pénalités pour l'achèvement précoce/ tardif du projet nous permet d'atteindre un degré considérable de réalisme.
- 3) Notre problème est considéré comme une extension des modèles proposés par Dodin & Elimam (2001), Hassanzadeh et al. (2009) et Babak H. Tabrizi & Ghaderi (2015b), mais en considérant en outre l'aspect multi-projets, multi-échelon, la planification de production et de distribution, ainsi que les contraintes de capacité limitée dans l'usine, l'entrepôt et les chantiers de construction.

CHAPITRE 3

PROBLÈME ET FORMULATION MATHÉMATIQUE

Dans ce chapitre, nous énonçons le problème étudié dans le cadre de ce projet ainsi que les hypothèses utilisées pour l'élaboration du modèle mathématique. Nous définissons par la suite la notation utilisée et nous exposons la formulation du modèle proposé. Dans le prochain chapitre, nous présentons les résultats analytiques de la mise en œuvre du modèle, en utilisant un exemple numérique afin d'en tirer une solution optimale au problème.

Ci-dessous une figure expliquant la méthodologie suivie pour le développement du modèle mathématique (Figure3.1).

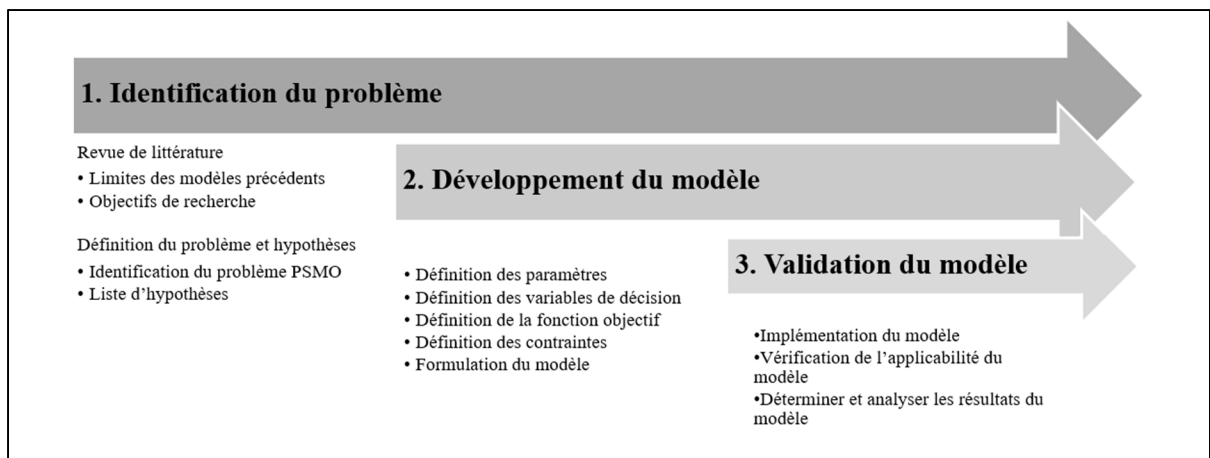


Figure 3.1 Méthodologie du développement du modèle

3.1 Énoncé du problème

Pour cette étude, nous considérons une chaîne d'approvisionnement multi-produits, multi-projets, à deux échelons avec un fabricant de produits modulaires, un entrepôt, et un ou plusieurs entrepreneurs généraux travaillant sur différents sites de construction ou entrepreneurs spécialisés de différents corps de métiers, à savoir la plomberie, la mécanique des bâtiments, l'électricité, la climatisation, etc.

Le fabricant peut fournir tous les types de produits modulaires $m \in M$ (où M est l'ensemble des produits modulaires) pour soutenir les différents chantiers $i \in I$ (où I est l'ensemble des chantiers) en cours d'exécution des travaux $j \in J$ (où J est l'ensemble des travaux du chantier).

L'entrepôt est utilisé pour stocker les produits modulaires avant leur distribution sur les différents sites de construction (les consommateurs de produits modulaires avec un taux spécifique) afin d'éviter les encombrements sur le site et de résoudre les problèmes dus au manque d'espace de stockage sur les chantiers de construction, plus spécifiquement les chantiers des zones urbaines.

Les différentes parties prenantes de cette chaîne d'approvisionnement collaborent les unes avec les autres pour réduire le coût global de la chaîne et finir les projets dans les délais prévus. Cette collaboration peut être réalisée à l'aide de récentes technologies dans cette industrie, à savoir le BIM. Les informations liées au déroulement des différents travaux de construction, la séquence des travaux, leurs durées, le délai d'achèvement du projet, une prévision sur la demande en matière de produits pour l'exécution de chaque activité, et toute autre information pertinente pour bien planifier l'approvisionnement des produits sur un chantier donné, peuvent être partagées en utilisant des outils de partage tels que le BIM avant le début des différents projets.

Un modèle mathématique intégré a été développé afin de représenter cette chaîne d'approvisionnement de l'industrie de construction pour déterminer la planification d'exécution des activités de chaque site, la planification de besoins de produits en fonction de la planification des projets, la planification de production ainsi que la planification du transport, tout en gérant les stocks chez chaque partie prenante afin d'éviter les coûts de stockage. La Figure 3.2 montre les différents échelons de la chaîne d'approvisionnement, les différentes parties prenantes et le flux des produits.

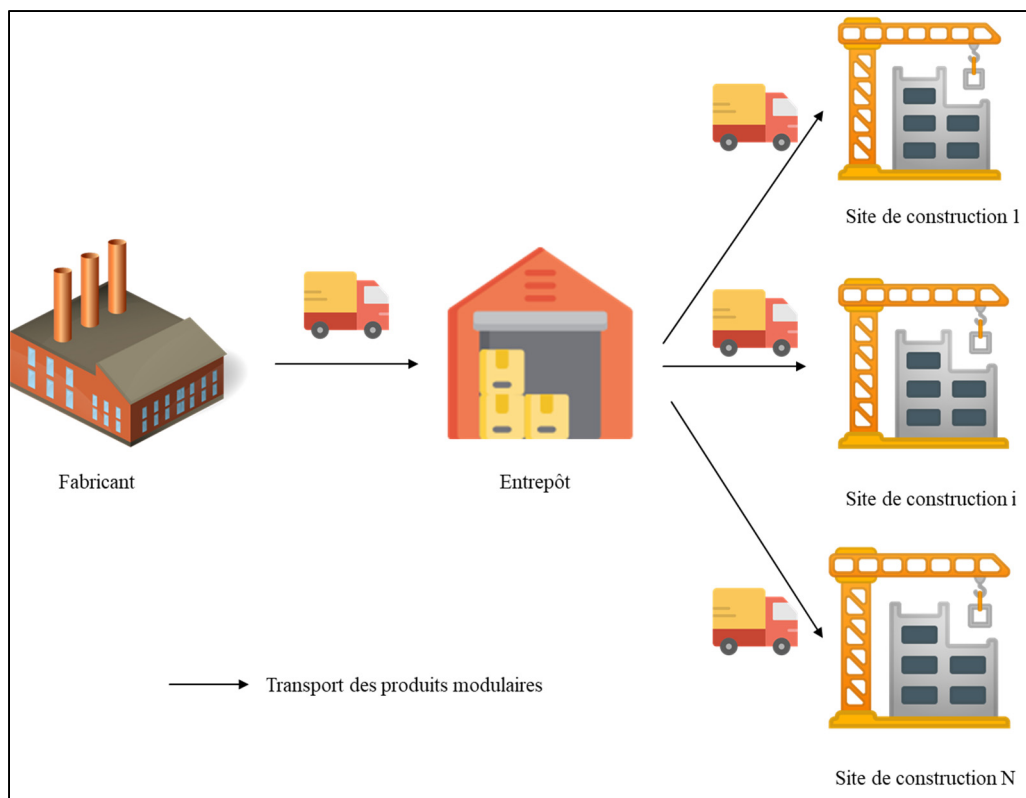


Figure 3.2 Les éléments de la chaîne d'approvisionnement

Dans chaque site de construction, nous avons un ensemble d'activités à exécuter. Chaque site sera représenté par un graphe orienté, pour montrer les relations de précédence, où les sommets représentent les activités et les flèches représentent l'ordre dans lequel les activités doivent être exécutées.

3.2 Hypothèses

Pour des raisons de simplicité et de réalité, nous introduisons les hypothèses suivantes :

- 1) Dans chaque site de construction, il existe un projet dont les activités ainsi que la demande pour les produits modulaires requis et les relations de précédence entre les activités peuvent être semblables ou différentes des projets des autres chantiers.
- 2) La quantité requise d'un produit pour exécuter une activité est une donnée, et tous les produits modulaires requis pour l'exécution d'une activité doivent être disponibles sur

le chantier avant le début de l'activité. La demande des produits modulaires est indépendante de la durée de l'activité, et la consommation des produits modulaires au cours de chaque activité se fait d'une façon linéaire. Il faut noter que nous ne prenons pas en compte le délai d'acquisition des produits.

- 3) Les relations de précédence entre les activités sont des relations de Fin-Début avec des décalages temporels nuls. Une activité ne peut alors commencer que si les activités directement antécédentes sont terminées et l'exécution d'une activité est effectuée sans interruption. La première et la dernière activité de chaque projet sont des activités fictives qui représentent le début et la fin du projet, respectivement. La durée et la demande de produits de ces deux activités sont nulles.
- 4) La durée d'une activité est considérée comme une variable de décision qui peut varier entre sa durée normale d'exécution (*Normal time*) et la durée maximale qu'on peut atteindre pour raccourcir la durée de cette l'activité (*Crash time*).
- 5) Les différents entrepreneurs acceptent de retarder leurs projets si cela réduit le coût global de la CSC.

3.3 Formulation mathématique

Avant de représenter le modèle mathématique, les indices, les ensembles, les paramètres et les variables de décision sont présentés ci-dessous.

3.3.1 Les indices et les ensembles

i	Indice des projets de construction (projets), $i = 1, 2, \dots, I$.
m	Indice des produits modulaires, $m = 1, 2, \dots, M$.
t	Indice des périodes, $t = 0, 1, 2, \dots, H$.
j	Indice des activités des projets, $j = 1, 2, \dots, n_i$.
k	Indice des activités antécédentes à l'activité j , $k = 1, 2, \dots, n_i$.
P_{ij}	Ensembles des activités antécédentes à l'activité j dans le site de construction i .

3.3.2 Les paramètres

Paramètres liés aux activités :

- α_{ij} Coût total de compression de l'activité j du projet i.
- β_{ij} Coût de réduction de la durée de l'activité j du projet i d'une période.
- μ_{ij} Limite supérieure de la durée de l'activité (*normal time*) du projet i.
- ν_{ij} Limite inférieure de la durée de l'activité j (*crash time*) du projet i.
- H Horizon temporel.
- L Nombre suffisamment grand.

Paramètres liés aux projets :

- d_i Date d'échéance du projet du site de construction i après laquelle un coût de pénalité sur le retard est payé.
- p_i Montant de la pénalité par période pour avoir fini le projet du site de construction i après la date d'échéance d_i .
- r_i Montant de la récompense par période pour avoir terminé le projet du site de construction i avant la date d'échéance d_i .

Paramètres liés aux sites de construction :

- cap^c_i Capacité maximale du site de construction i en m^3 .
- hc_i Coût de possession de stocks par m^3 pendant une période sur le site de construction i.

Paramètres liés à l'entrepôt :

- cap^w Capacité maximale de l'entrepôt en m^3 .
- hw Coût de possession de stocks par m^3 pendant une période dans l'entrepôt.

Paramètres liés au fabricant :

- cap^m Capacité maximale de l'usine en m^3 .
- hm Coût de possession de stocks par m^3 pendant une période dans l'usine.

Paramètres liés aux produits modulaires :

oc_m	Coût de passation de commande du produit modulaire m (coût d'une transaction).
δ_{mij}	Quantité requise du produit modulaire m pour exécuter l'activité j du projet i.
vol_m	Le volume du produit modulaire m en m ³ .
sc_m	Coût de configuration pour la production du produit modulaire m à chaque période.
II_{m0}	Stock initial du produit modulaire m à la période t=0.
mr_m	Capacité maximale de production du produit modulaire m par période.
mc_m	Coût de production par unité du produit modulaire m.

Paramètres liés au transport des produits modulaires :

tc^{mw}	Coût du transport des produits de l'usine à l'entrepôt en m ³ .
tc^{wc_i}	Coût du transport des produits de l'entrepôt au site de construction i en m ³ .
cap^{tmw}	Capacité maximale du camion allant de l'usine à l'entrepôt par camion en m ³ .
cap^{twc_i}	Capacité maximale du camion allant de l'entrepôt au site de construction i en m ³ .

3.3.3 Les variables de décision

φ_{mit}	Égale à 1 si au moins une unité du produit modulaire m est commandée par le site de construction i à la période t, 0 sinon.
ϖ_{ijt}	Égale à 1 si l'activité j au site de construction i est achevée à la période t, 0 sinon.
ζ_{ijt}	Égale à 1 si l'activité j du site de construction i est démarrée à la période t, 0 sinon.
λ_{ij}	Durée de l'activité j du site de construction i.
χ_{mt}	Quantité fabriquée du produit modulaire m à la période t.
θ_{mt}	Égale à 1 si une unité du produit modulaire m a été fabriquée à la période t, 0 sinon.
I^C_{mit}	Niveau du stock du produit modulaire m sur le chantier i à la fin de la période t.
I^W_{mt}	Niveau du stock du produit modulaire m à l'entrepôt à la fin de la période t.
I^M_{mt}	Niveau du stock du type de produit modulaire m à l'usine à la fin de la période t.
ε^{mw}_{mt}	Quantité du produit modulaire m transportée de l'usine à l'entrepôt à la période t.
ε^{wc}_{mit}	Quantité du produit modulaire m transportée de l'entrepôt au chantier i à la période t.

3.3.4 La fonction objectif

En prenant en considération la notation et les hypothèses mentionnées dans la section précédente, le modèle mathématique proposé pourra être présenté par la formulation en programmation linéaire mixte en nombres entiers (MIP).

La fonction objectif consiste à minimiser le coût total de la chaîne d'approvisionnement, qui comprend les coûts liés au fabricant, à l'entrepôt et aux différents entrepreneurs travaillant sur les différents sites de construction. Le coût total de la chaîne d'approvisionnement est la somme des différents coûts générés à ses différents niveaux, et qui est :

Coût total = Coût de production (MC) + Coût de passation de commandes (OC) + Coût des activités (AC) + Coût de transport (TC) + Coût de possession de stocks (IC) + Récompense et pénalité (RPP). MC, OC, AC, TC, IC et RPP sont formulés par les équations ci-dessous :

$$MC = \sum_{m=1}^M \sum_{t=0}^H (mc_m \chi_{mt} + sc_m \theta_{mt}) + \sum_{m=1}^M m_{cm} I_{m0} \quad (3.1)$$

$$OC = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \sum_{t=0}^H O_{cm} \varphi_{mit} \quad (3.2)$$

$$AC = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{n_i} (\alpha_{ij} - \beta_{ji} (\lambda_{ji} - v_{ij})) \quad (3.3)$$

$$TC = \sum_{m=1}^M vol_m \sum_{t=0}^H \left(\frac{tc^{mw}}{cap^{tmw}} * \varepsilon_{mt}^{mw} + \frac{1}{cap^{tmc}} \sum_{i=1}^I tc_i^{wc} \varepsilon_{mit}^{wc} \right) \quad (3.4)$$

$$IC = \sum_{m=1}^M vol_m \sum_{t=0}^H \left(h_{mt}^m m_{mt} + h_{mt}^w w_{mt} + \sum_{i=1}^I h_i^c * I_{mit}^c \right) \quad (3.5)$$

$$RPP = \sum_{i=1}^I \left(\sum_{t=d_i+1}^H p_i(t - (d_i + 1))\omega_{in_i t} - \sum_{t=0}^{d_i+1} r_i(d_i + 1 - t)\omega_{in_i t} \right) \quad (3.6)$$

La minimisation de la somme des équations (3.1) - (3.6) permet d'optimiser le coût total de la chaîne. (3.1) représente le coût de production qui comprend le coût de fabrication de chaque produit pendant chaque période t , le coût de configuration par période pour chaque produit, ainsi que le coût de production du stock initial dans l'usine pour la période $t=0$. Ce dernier est une constante. (3.2) représente le coût de passation des différentes commandes tout au long du projet. (3.3) représente le coût lié à l'exécution des activités. Pour un projet et une activité donnée, ce coût est égal au coût de la compression de l'activité s'il y a eu compression, sinon il est égal au coût normal de l'activité. (3.4) représente le coût de transport de l'usine vers l'entrepôt et de l'entrepôt vers les chantiers. (3.5) représente le coût de possession de stock dans l'usine, l'entrepôt et les chantiers. Finalement (3.6) représente la pénalité à payer en cas de retard ou la récompense à recevoir si le projet est achevé en avance.

3.3.5 Contraintes du modèle

Contraintes liées au projet :

$$\sum_{t=0}^H t\zeta_{ikt} + \lambda_{ik} \leq \sum_{t=0}^H t\zeta_{ijt}, \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J, \quad \forall k \in P_{ij} \quad (3.7)$$

$$\varpi_{i10} = 1, \quad i = 1, \dots, I \quad (3.8)$$

$$\lambda_{in_i} = 0, \quad i = 1, \dots, I \quad (3.9)$$

$$\sum_{t=1}^H \zeta_{ijt} = 1, \quad i = 1, \dots, I \quad (3.10)$$

$$\sum_{t=0}^H \varpi_{ijt} = 1, \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 2, \dots, n_i \quad (3.11)$$

$$\sum_{t=0}^H t\zeta_{ijt} + \lambda_{ij} = \sum_{t=0}^H t\varpi_{ijt}, \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 2, \dots, n_i \quad (3.12)$$

$$\mu_{ij} \leq \lambda_{ij} \leq v_{ij}, \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, n_i \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_{mit}^{wc} \leq L\varphi_{mit}, \quad m = 1, \dots, M, \quad i = 1, \dots, I, \quad t = 1, \dots, H \quad (3.14)$$

La contrainte (3.7) prend en compte les relations de précédence entre les différentes activités. Les contraintes (3.8) et (3.9) montrent que la première et la dernière activité de tous les projets sont fictives. Les contraintes (3.10) et (3.11) garantissent que chaque activité ne peut avoir qu'une seule période de début et une seule période de fin. De plus, elles obligent les chantiers à terminer le projet correspondant pendant l'horizon temporel de planification H . Les contraintes (3.12) et (3.13) limitent la durée de chaque activité entre sa limite inférieure et sa limite supérieure. La contrainte (3.14) garantit que si un produit modulaire est transporté au site de construction, une commande a été passée à cette période.

Contraintes liées à l'équilibre des niveaux du stock :

$$I_{m0}^w = I_{mi0}^m = 0, \quad m = 1, \dots, M, \quad i = 1, \dots, I \quad (3.15)$$

$$I_{m0}^m = II_{m0}, \quad m = 1, \dots, M \quad (3.16)$$

$$I_{mt}^m = I_{m(t-1)}^m + \chi_{mt} - \varepsilon_{mt}^{mw}, \quad m = 1, \dots, M, \quad t = 1, \dots, H - 1 \quad (3.17)$$

$$I_{mt}^w = I_{m(t-1)}^w + \varepsilon_{mt}^{mw} - \sum_{i=1}^I \varepsilon_{mit}^{wc}, \quad m = 1, \dots, M, \quad t = 1, \dots, H-1 \quad (3.18)$$

$$I_{mit}^c = I_{mi(t-1)}^c + \varepsilon_{mit}^{wc} - \sum_{j=1}^J \delta_{mij} \zeta_{ijt}, \quad m = 1, \dots, M, \quad i = 1, \dots, I, \quad t = 1, \dots, H-1 \quad (3.19)$$

Les contraintes (3.15) - (3.19) équilibrent le niveau du stock dans chaque période, en considérant qu'il n'y a pas de stock initial dans l'entrepôt et sur les sites de construction et qu'il existe un stock initial seulement dans l'usine. L'équation (3.19) est formulée en supposant que le produit modulaire requis pour chaque activité doit être disponible au moment du début de l'activité.

Contraintes liées aux capacités :

$$\sum_{m=1}^M I_{mt}^m vol_m \leq cap^m, \quad t = 0, \dots, H-1 \quad (3.20)$$

$$\sum_{m=1}^M I_{mt}^w vol_m \leq cap^w, \quad t = 0, \dots, H-1 \quad (3.21)$$

$$\sum_{m=1}^M I_{mit}^c vol_m \leq cap_i^c, \quad i = 1, \dots, I, \quad t = 0, \dots, H-1 \quad (3.22)$$

$$\chi_{mt} \leq mr_m, \quad m = 1, \dots, M, \quad t = 0, \dots, H-1 \quad (3.23)$$

$$\chi_{mt} \leq L\theta_{mt}, \quad m = 1, \dots, M, \quad t = 0, \dots, H-1 \quad (3.24)$$

Les contraintes (3.20) - (3.22) garantissent que le niveau de stock pendant chaque période ne dépasse pas la capacité maximale de l'usine, de l'entrepôt et des chantiers, respectivement.

La contrainte (3.23) stipule que le taux de production du produit m pendant chaque période ne doit pas dépasser la capacité maximale de production du produit m dans l'usine.

La contrainte (3.24) oblige la variable binaire liée à la configuration de la production du produit à être égale à un si la quantité produite du produit m est non nulle pendant la période t .

Contraintes liées aux variables binaires et positives :

$$\varphi_{mit} \in \{0, 1\}, \quad m = 1, \dots, M, i = 1, \dots, I, \quad t = 0, \dots, H \quad (3.25)$$

$$\theta_{mt} \in \{0, 1\}, \quad m = 1, \dots, M, \quad t = 0, \dots, H \quad (3.26)$$

$$\varpi_{ijt}, \zeta_{ijt} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, n_i, \quad t = 0, \dots, H \quad (3.27)$$

$$\lambda_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, n_i \quad (3.28)$$

$$\chi_{mt}, \quad I_{mt}^m, \quad I_{mt}^w, \varepsilon_{mt}^{mw} \geq 0, \quad m = 1, \dots, M, t = 0, \dots, H \quad (3.29)$$

$$I_{mit}^c, \varepsilon_{mit}^{wc} \geq 0, \quad m = 1, \dots, M, \quad i = 1, \dots, I \quad t = 0, \dots, H \quad (3.30)$$

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons énoncé le problème pris en considération dans ce projet, les hypothèses qui y sont liées ainsi que la formulation mathématique du modèle mathématique. Dans le prochain chapitre, nous allons présenter un exemple numérique qui va être utilisé pour valider l'applicabilité du modèle proposé, et nous allons présenter les résultats de l'implémentation.

CHAPITRE 4

VALIDATION DU MODÈLE

Dans ce chapitre, nous allons illustrer l'utilisation du modèle proposé avec un exemple d'une chaîne d'approvisionnement de l'industrie de construction. Nous allons présenter les données utilisées pour cette illustration ainsi que les résultats analytiques obtenus à la suite de l'implémentation et de l'exécution du modèle mathématique. Ensuite, nous allons présenter une comparaison entre l'utilisation du modèle intégré dans une chaîne d'approvisionnement pour gérer deux projets de construction simultanément, et l'utilisation du modèle pour gérer chacun de ces deux séparément.

4.1 Exemple numérique

Afin de présenter l'applicabilité du modèle intégré développé et d'illustrer sa robustesse, un exemple numérique a été considéré pour une chaîne d'approvisionnement composée d'un fabricant, d'un entrepôt et de deux projets dans deux chantiers de construction différents ($i=2$) (voir Figure 4.1). Les valeurs numériques sont inspirées de la littérature afin de reproduire un scénario réel de la chaîne d'approvisionnement pour les projets de construction ; les données sont principalement inspirées de Hsu, Angeloudis, & Aurisicchio (2018).

Nous avons eu recours à cette étude, car elle traite une chaîne d'approvisionnement de la construction comme le cas de notre étude, avec un fabricant, un entrepôt et plusieurs projets de construction. Cependant, les auteurs ne traitent pas le problème PSMO, mais plutôt seulement la planification logistique pour la construction modulaire. Ils ont présenté une étude de cas et le problème traité implique une seule usine de fabrication, un entrepôt pour le stockage temporaire et l'assemblage de deux types distincts de modules de salle de bain. Les données sont obtenues à la fois d'une grande entreprise de construction britannique et de ressources accessibles au public, et concernent des modules de salle de bain modulaires pour un projet de construction résidentiel. Les principaux paramètres d'entrée utilisés dans leur modèle mathématique ont été recueillis à partir de documents de projet et d'entretiens avec des

experts en la matière. Les données concernant les coûts ont été recueillies à partir de publications universitaires et de sites web. Des petites modifications ont été apportées aux données pour les adapter à notre problème. Les données concernant les coûts des activités ne sont pas inspirées de cette étude, étant donné que les auteurs ne traitent pas le problème d'ordonnement des projets.

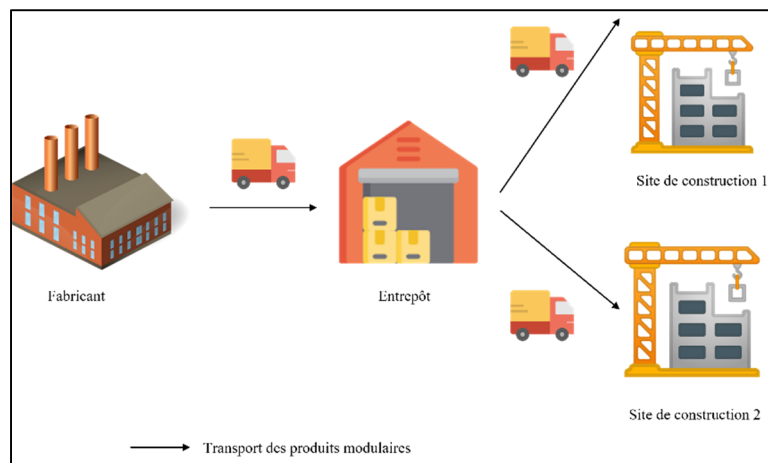


Figure 4.1 Exemple avec deux sites de construction

Dans la pratique, ces données peuvent être récupérées en utilisant les outils de modélisation des informations des projets de construction et qui permettent la modélisation des données des chantiers.

Dans cet exemple et par souci de simplicité, nous avons considéré deux projets similaires en matière de nombre d'activités et de relations de précedence.

Chaque projet de construction comprend dix activités ($j=10$), la première et la dernière activité de chaque projet sont des activités fictives qui représentent respectivement le début et la fin du projet. Les relations de précedence entre toutes les activités sont de type fin-début avec des décalages temporels nuls (Figure 4.2).

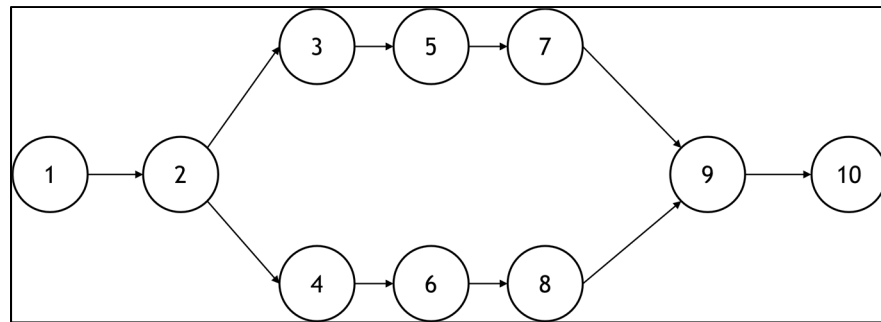


Figure 4.2 Graphe des activités du site de construction i

4.1.1 Les données

Les relations de précédence entre les activités des deux projets, le normal time et le crash time, les coûts normaux des activités et les coûts de compression des activités des projets sont présentés dans le Tableau 4.1.

Les paramètres relatifs aux produits modulaires sont présentés dans le Tableau 4.2. Dans notre exemple, nous considérons deux types de produits modulaires ($m=2$).

Les produits modulaires dans cet exemple peuvent faire l'objet d'un élément de construction intérieur préfabriqué, par exemple, un module de salle de bain, une kitchenette ou un panneau mural (Figure 4.3).



Figure 4.3 Module de salle de bain et panneau mural typique préfabriqués
Tirée de Antillón, Morris, & Gregor (2014)

Nous allons prendre l'exemple d'une POD de salle de bain. Il s'agit d'une unité manufacturée spécifique au projet de construction en question, conçue et assemblée selon la conception et les spécifications demandées. Elle est construite en usine, entièrement équipée et plombée, livrée sur le chantier et prête à l'emploi.

Les activités dans cet exemple sont les activités d'assemblage des POD sur les chantiers de construction. Chaque activité nécessite un nombre bien déterminé de POD pour son exécution. La succession des activités peut être vue comme l'installation et l'assemblage des POD sur les différents étages ou parties d'un bâtiment.

Les paramètres liés au stockage, au transport et aux dates d'échéance de chaque projet sont présentés dans le Tableau 4.3.

L'horizon a été fixé à 24 périodes, les dates d'échéance des projets sont égales à la durée de leurs chemins critiques respectivement. La taille de l'horizon a été fixée selon la conclusion tirée de Dodin & Elimam (2001) sur la réduction de l'horizon de planification au maximum, ce qui entraîne une réduction significative dans la taille du modèle mathématique.

Nous avons considéré un coût de possession de stock dans le site de construction plus élevé que le coût de possession de stock dans l'entrepôt ou chez le fabricant puisque nous nous intéressons aux zones urbaines. Aussi, nous avons considéré un coût de possession de stock chez le fabricant plus élevé que celui de l'entrepôt.

La capacité maximale du fabricant est égale au volume du stock initial. Le stock initial doit satisfaire la demande de la première activité de chaque projet. L'entrepôt a une capacité relativement non limitée. Et la capacité du chantier de construction est très limitée.

Tableau 4.1 Paramètres liés aux activités du projet de construction

i	j	Prédécesseur	Coût de compression	Coût normal	Coût de compression par période	Limite supérieure	Limite inférieure
1	1	-	0 \$	0 \$	0 \$	0	0
	2	1	100 \$	60 \$	20 \$	4	2
	3	2	200 \$	60 \$	35 \$	5	1
	4	2	150 \$	50 \$	25 \$	5	1
	5	3	65 \$	45 \$	10 \$	3	1
	6	4	200 \$	90 \$	55 \$	5	3
	7	5	300 \$	80 \$	110 \$	5	3
	8	6	100 \$	60 \$	20 \$	4	2
	9	7-8	200 \$	60 \$	35 \$	5	1
	10	9	0 \$	0 \$	0 \$	0	0
2	1	-	0 \$	0 \$	0 \$	0	0
	2	1	90 \$	50 \$	40 \$	3	2
	3	2	100 \$	50 \$	25 \$	3	1
	4	2	140 \$	40 \$	50 \$	4	2
	5	3	55 \$	35 \$	20 \$	3	2
	6	4	180 \$	80 \$	50 \$	5	3
	7	5	270 \$	70 \$	200 \$	4	3
	8	6	90 \$	50 \$	40 \$	3	2
	9	7-8	100 \$	50 \$	25 \$	3	1
	10	9	0 \$	0 \$	0 \$	0	0

Tableau 4.2 Paramètres liés aux produits modulaires

Produit modulaire	Volume en m3	Coût de commande	Capacité maximale de production par période	Coût de production par unité	Coût de configuration par période
1	10	\$ 45	4	\$ 500	\$ 50
2	5	\$ 45	4	\$ 300	\$ 30

Tableau 4.3 Paramètres liés au stockage, au transport et aux projets

Paramètre	Valeur/unité
Capacité maximale de chaque site de construction i en m^3	50 m^3
Coût de possession de stock en m^3 par période dans chaque site de construction i	\$ 7
Capacité maximale de l'entrepôt en m^3	1600 m^3
Coût de possession de stock en m^3 par période dans l'entrepôt	\$ 1
Capacité maximale de l'usine en m^3	60 m^3
Coût de possession de stock en m^3 par période dans l'usine	\$ 3
Stock initial de chaque produit modulaire m dans l'usine à $t=0$	4 unités
Coût de transport de l'usine vers l'entrepôt par camion	\$ 50
Coût de transport de l'usine de l'entrepôt vers le site de construction i par camion	\$ 20
Capacité du camion allant de l'usine vers l'entrepôt en m^3	60 m^3
Capacité du camion allant de l'entrepôt vers le site de construction i en m^3	30 m^3
Date d'échéance du projet 1 et 2 respectivement après laquelle une pénalité doit être payée	Période 23/ 18

La Figure 4.3 montre le nombre d'unités de produit modulaire m requis pour chaque chantier par activité. Nous supposons que la demande est connue. De plus, par souci de simplicité, nous supposons que les deux chantiers ont une demande similaire.

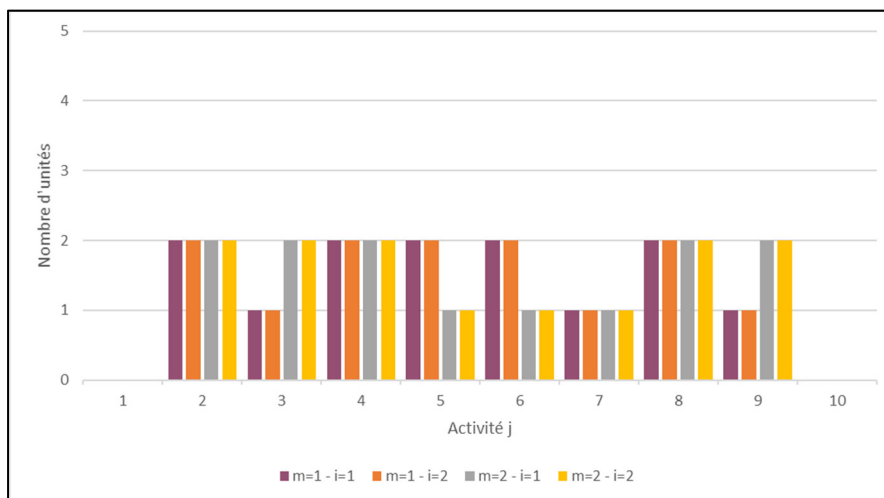


Figure 4.4 Profil de la demande pour chaque produit pour chaque projet par activité

4.1.2 Implémentation du modèle mathématique

Le modèle proposé est formulé comme un problème MILP. Il a été implémenté à l'aide de Pyomo sur l'environnement de développement Spyder. Les relations mathématiques ont été saisies à l'aide de Pyomo qui est un langage de modélisation d'optimisation mathématique basé sur Python et qui est doté d'un ensemble diversifié de capacités d'optimisation. Une fois le problème ainsi défini, l'optimisation se fait grâce au solveur Gurobi, pour résoudre les différentes instances du problème. L'optimisation est exécutée sur un poste de travail avec un processeur Intel(R) Core (TM) i5-1035G7 CPU @ 1.20GHz 1.50 GHz et une mémoire de 8,00 Go. Le problème a été résolu avec des solutions satisfaisantes en deux minutes en moyenne, ce qui est considéré acceptable comme temps de résolution pour la taille de ce projet.

4.1.3 Résultats

Après avoir exécuté le modèle, les résultats relatifs aux variables de décision et à la fonction objectif sont générés et présentés ci-dessous.

4.1.3.1 Planification des activités des projets

L'exécution du modèle permet de générer une planification pour les deux projets correspondant à l'horizon de planification fixé, où nous pouvons voir la date de début et de fin de chaque activité des deux chantiers. La planification est représentée ci-dessous par un diagramme de Gantt (Figure 4.4).

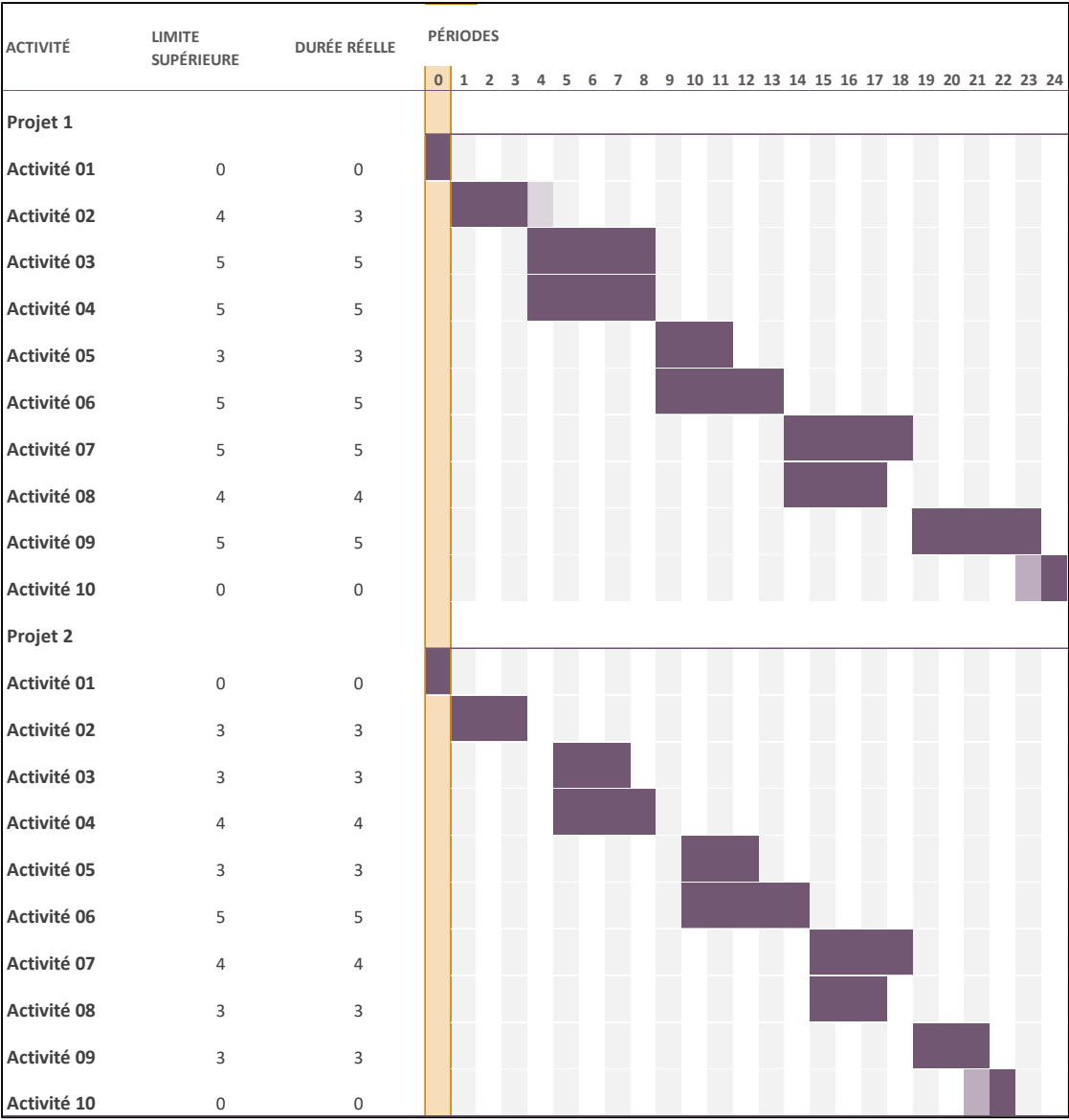


Figure 4.5 Planification des activités des deux projets

Nous pouvons remarquer que le projet 1 a respecté sa date d’échéance et il a été achevé à la fin de la période 23. Cependant, le projet 2 a été retardé de 3 périodes pour finir à la fin de la période 21 alors que sa date d’échéance est la période 18 (la fin vers la fin de la période 23 correspond à l’activité de fin fictive). Nous pouvons remarquer aussi qu’il y a eu une compression d’une période au niveau de l’activité 2 du projet 1.

4.1.3.2 Suivi des commandes

Simultanément, avec la génération de la planification des activités, les résultats du modèle permettent aussi de suivre le flux des différents produits destinés aux différents chantiers à la suite des différentes commandes.

Tout d'abord, en ayant la demande de chaque activité comme donnée et en ayant la date de début de chaque activité, nous pouvons tracer le profil de la demande de chaque produit par période (voir Figure 4.5 et Figure 4.7). Ensuite, nous pouvons suivre comment chaque demande est traitée. Avec la Figure 4.6 et la Figure 4.8, nous pouvons suivre les commandes, la planification de production, la planification de distribution des produits, suivre le niveau de stock de chaque produit chez le fabricant, à l'entrepôt et sur les différents sites de construction à la fin de chaque période.

Nous pouvons remarquer qu'à la suite de chaque demande de produit, un ordre de commande est lancé, s'il n'y a pas de stock sur le site, ni dans l'entrepôt, ni chez le fabricant, une production de la quantité requise est lancée, puis les produits sont envoyés à l'entrepôt puis aux chantiers. La production et le transport des produits à la suite d'une demande se font en juste à temps (*Just In Time*), car nous ne prenons pas en compte dans ce problème ni le temps de production ni les délais de livraison.

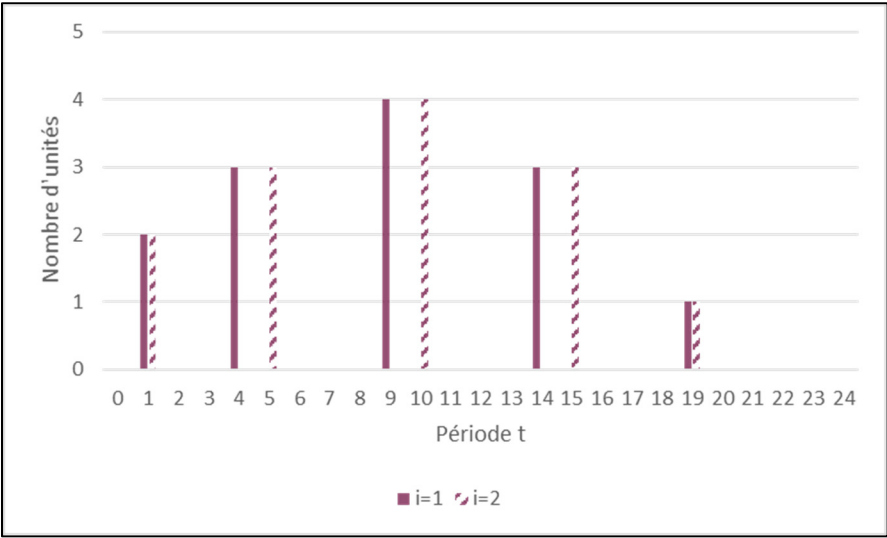


Figure 4.6 Demande du produit 1 pour chaque chantier par période

T	Nombre d'ordre	Stock dans l'usine	Lancement production	Quantité produite	Quantité trasnportée	Stock dans l'entrepôt	Quantité transportée vers le chantier 1	Stock sur le chantier 1	Quantité transportée vers le chantier 2	Stock sur le chantier 2
0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2	0	0	0	4	0	2	0	2	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	0	1	3	3	0	3	0	0	0
5	1	0	1	3	3	0	0	0	3	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	0	1	4	4	0	4	0	0	0
10	1	0	1	4	4	0	0	0	4	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1	0	1	3	3	0	3	0	0	0
15	1	0	1	3	3	0	0	0	3	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	2	0	1	2	2	0	1	0	1	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 4.7 Suivi des commandes du produit 1

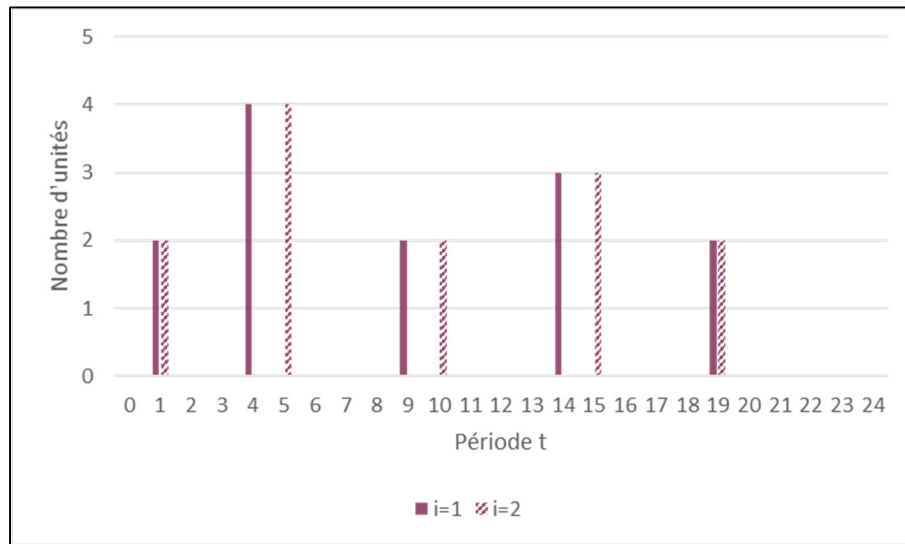


Figure 4.8 Demande du produit 2 pour chaque chantier par période

T	Nombre d'ordre	Stock dans l'usine	Lancement production	Quantité produite	Quantité transportée	Stock dans l'entrepôt	Quantité transportée vers le chantier 1	Stock sur le chantier 1	Quantité transportée vers le chantier 2	Stock sur le chantier 2
0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2	0	0	0	4	0	2	0	2	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	0	1	4	4	0	4	0	0	0
5	1	0	1	4	4	0	0	0	4	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	0	1	4	4	2	2	0	0	0
10	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1	0	1	3	3	0	3	0	0	0
15	1	0	1	3	3	0	0	0	3	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	2	0	1	4	4	0	2	0	2	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 4.9 Suivi des commandes du produit 2

Nous pouvons remarquer aussi que le modèle a évité de stocker des produits chez les 3 membres de la chaîne. Le seul cas où des produits ont été stockés était au niveau de l'entrepôt, car il représente le plus bas coût de possession de stock, également pour optimiser le transport des commandes et afin d'éviter la congestion sur le site de construction.

4.1.3.3 Coût total

Le coût total de la solution optimale de ce problème est de 23 955 \$ et répartie comme montré dans le Tableau 4.4.

Tableau 4.4 Éléments du coût total

Coût des activités	950 \$
Coût des commandes	900 \$
Coût de production	17 600 \$
Coût de configuration	530 \$
Coût de transport	585 \$
Coût du stock	190 \$
Pénalité	- \$
Récompense	- \$
Production stock initial	3 200 \$
Total	23 955 \$

4.1.3.4 Interprétation

Il faut noter que dans cette première analyse, nous avons fixé des valeurs de pénalité et de récompense nulles. Dans ce cas, la fonction objective devient indépendante de la date de début et de fin du projet ce qui permet d'étudier la solution du modèle intégrée sans le faire pousser à faire la compression pour éviter les pénalités ou pour avoir une récompense. Par conséquent, nous avons voulu comprendre la raison pour laquelle le modèle a choisi de faire la compression de l'activité 2 du projet 1 et choisi de payer plus en matière de coûts d'activité, une analyse des coûts de la solution sans la compression a donc été faite.

Pour pouvoir faire cette comparaison, nous avons exécuté le modèle en relaxant la contrainte (3.12) et en changeant la contrainte (3.13) afin d'éliminer la possibilité de compression des activités. L'équation (3.13) devient :

$$\lambda_{ij} = v_{ij}, \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, n_i \quad (4.1)$$

Les coûts dans ce cas sont détaillés dans le Tableau 4.5.

Tableau 4.5 Éléments du coût total sans la compression

Coût des activités	930 \$
Coût des commandes	990 \$
Coût de production	17 600 \$
Coût de configuration	530 \$
Coût de transport	585 \$
Coût du stock	190 \$
Pénalité	- \$
Récompense	- \$
Production stock initial	3 200 \$
Total	24 025 \$

Dans ce cas, le coût des activités 930 \$ correspond à la somme des coûts normaux des activités, c'est-à-dire si nous n'avons pas de compression. Dans le premier cas, le coût était de 950 \$, qui correspond aux coûts normaux des activités, avec le coût de compression d'une activité d'une période qui est de 20 \$.

Cette solution fournit un coût total plus élevé que la première solution, la différence se trouvant au niveau des coûts de commandes : 22 commandes pour la solution sans compression versus 20 commandes pour la première solution. Cela veut dire que le modèle a choisi de faire la compression pour pouvoir agréger les commandes et réduire les coûts qui en découlent.

Vu qu’il n’y a pas eu de compression dans ce cas, le calendrier est un peu différent du premier calendrier, mais cela n’a pas eu d’impact sur les dates de fin des projets (voir Figure 4.10).

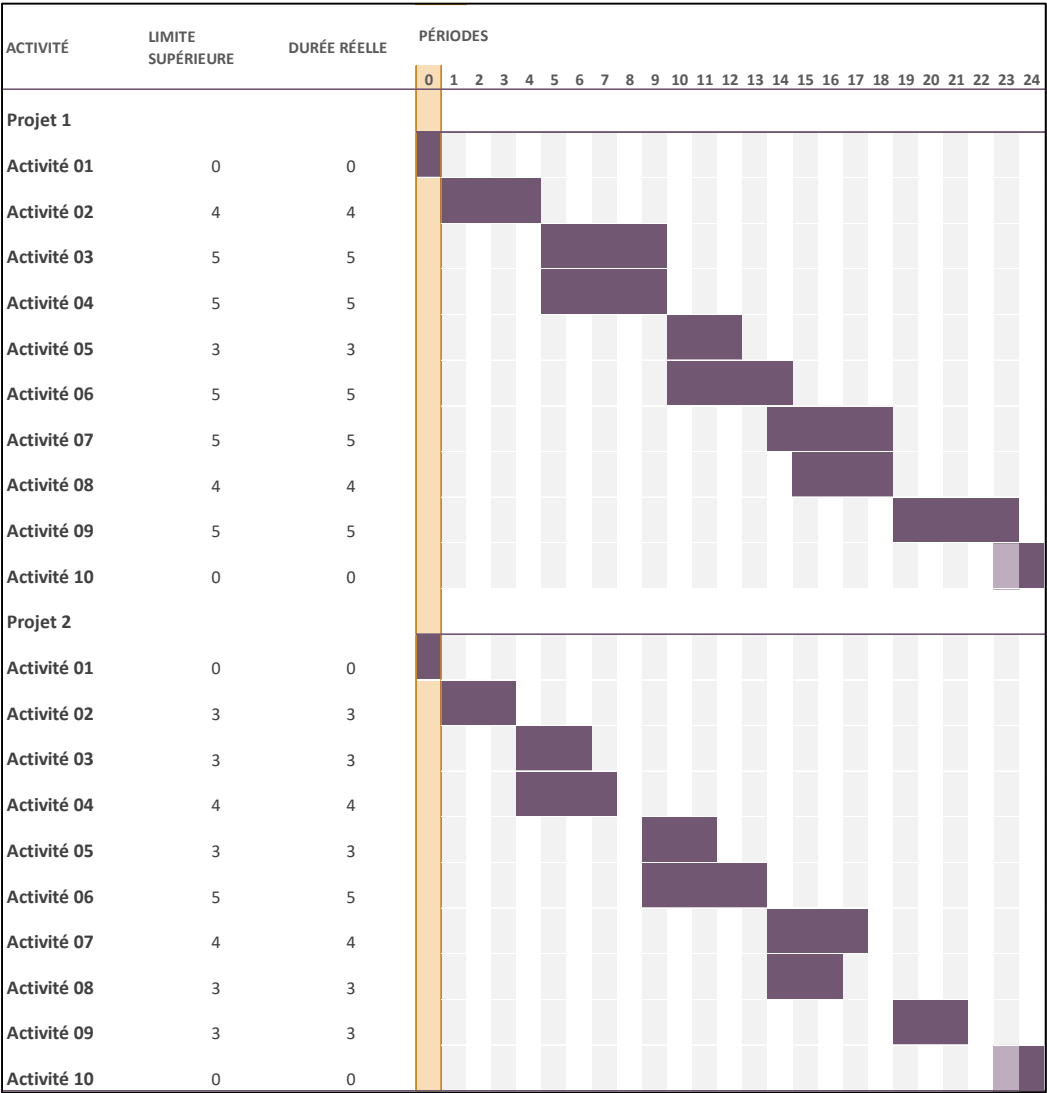


Figure 4.10 Calendrier des deux projets sans compression

Il y a eu aussi un petit changement au niveau du plan de production et du plan de distribution par suite du changement de plan de commandes. Finalement, aucune différence au niveau des stocks dans l’usine, ni dans l’entrepôt, ni sur les chantiers.

4.2 Comparaison du problème intégré et du problème non-intégré

Pour répondre au premier objectif dans ce projet de recherche, qui est de déterminer la valeur de la collaboration dans une chaîne d'approvisionnement de l'industrie de la construction, nous avons réalisé une étude comparative entre le cas où il n'y a pas de collaboration dans la chaîne d'approvisionnement, donc la planification ne se fait d'une manière intégrée pour les différents projets, et le cas où les acteurs de la chaîne d'approvisionnement collaborent les uns avec les autres, donc de façon intégrée. Dans le cas où il n'y a pas de collaboration, nous avons exécuté le modèle comme si nous avions deux chaînes d'approvisionnement séparées, une pour le projet du site de construction 1, et une pour le projet du site de construction 2 (Figure 4.11). Dans ce cas, nous avons le même fabricant et le même entrepôt qui livrent à deux chantiers de construction différents sans prendre en compte la possibilité d'agrégation de production et de transport.

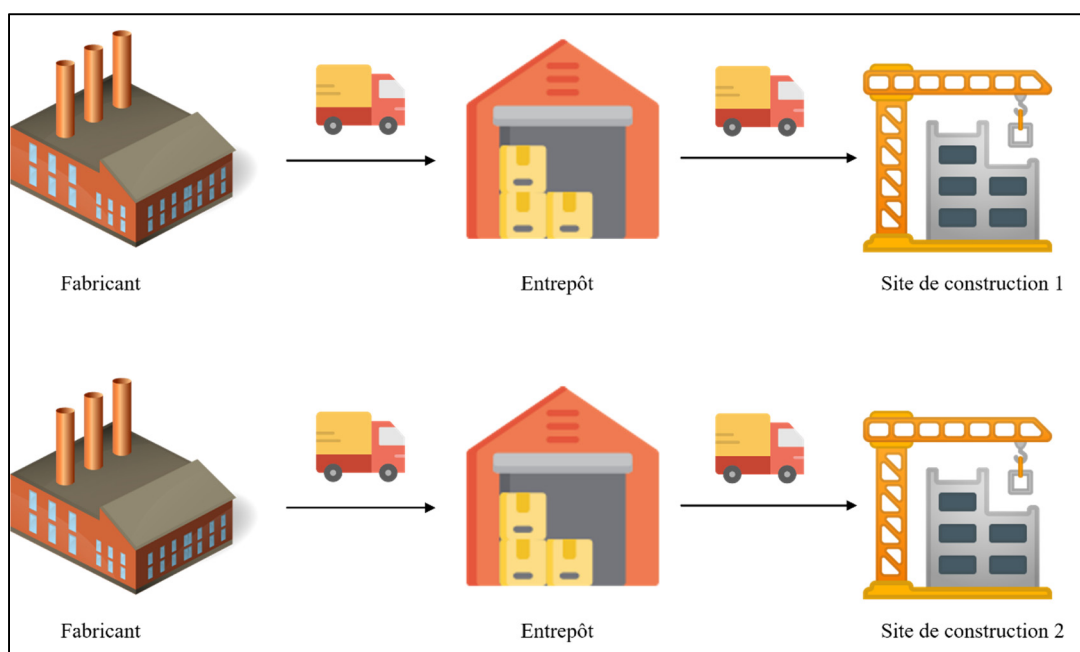


Figure 4.11 Exemple d'une CSC avec deux sites de construction non intégrée

Nous considérons les mêmes paramètres liés aux activités du projet de construction qui sont présentés dans le Tableau 4.6. Nous considérons les mêmes paramètres liés aux produits

modulaires, au stockage sur les chantiers et aux dates d’échéances des projets, présentés dans le Tableau 4.1, le Tableau 4.2 et le Tableau 4.3, avec des modifications au niveau des paramètres de production, de stockage dans l’usine et dans l’entrepôt et de la capacité des camions.

La capacité de production et la capacité de stockage dans l’usine ainsi que dans l’entrepôt sont divisées en deux.

Tableau 4.6 Paramètres liés au projet i

Paramètre	Valeur/unité
Capacité maximale de production par période	2 unités
Capacité maximale de l’entrepôt en m ³	800 m³
Capacité maximale de l’usine en m ³	30 m³

4.2.1 Comparaison des calendriers des activités

Pour comparer les deux planifications, nous avons considéré comme base de référence un modèle ne tenant pas compte de la récompense/pénalité pour la date d’achèvement du projet.

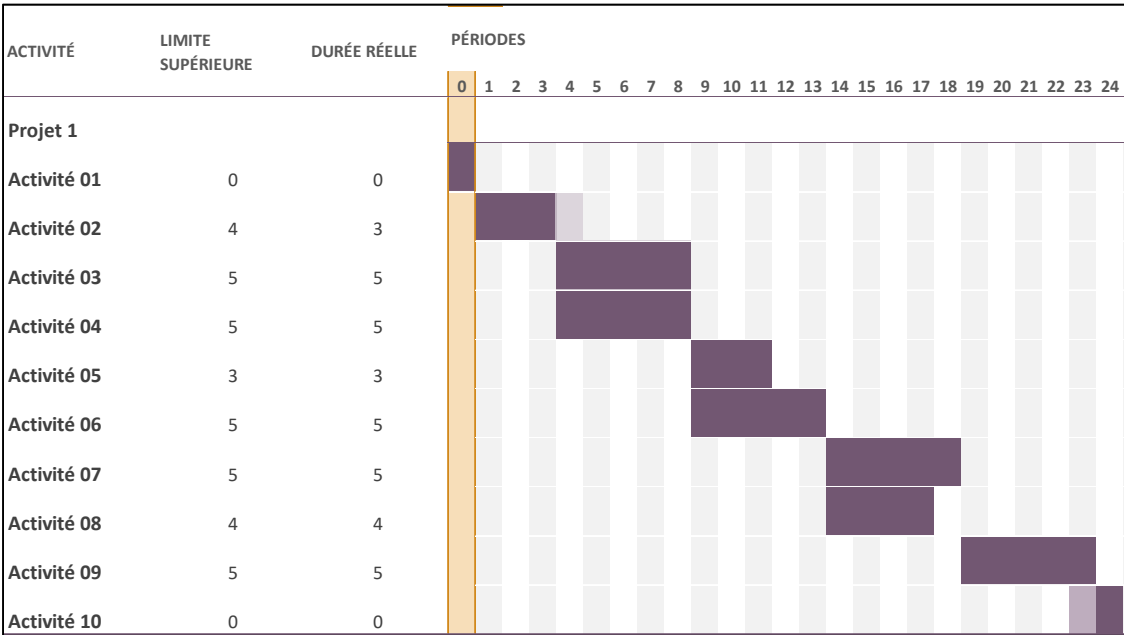


Figure 4.12 Calendrier du projet 1

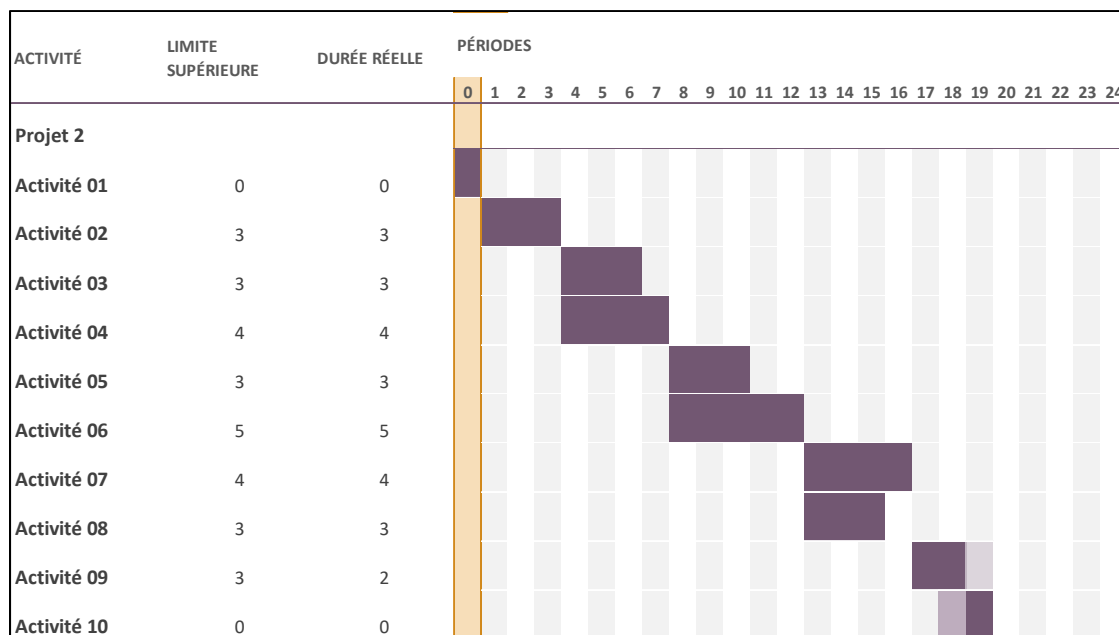


Figure 4.13 Calendrier du projet 2

L'exécution du modèle pour le projet 1 permet de générer un calendrier pour ses activités présentées dans la Figure 4.12. Dans ce cas, il y a eu compression d'une période au niveau de l'activité 2 comme dans le cas du modèle intégré. Le projet 1 s'achève à la fin de la période 23 comme dans le modèle intégré. L'exécution du modèle pour le projet 2 permet de générer un calendrier pour ses activités présentées dans la Figure 4.13. Dans ce cas, il y a eu compression d'une période au niveau de l'activité 9, contrairement au modèle intégré où il n'y a pas eu de compression. Cependant, le projet 2 s'achève à la fin de la période 18 qui correspond à la date d'échéance du projet. Dans le cas du modèle intégré, ce projet a été retardé de 3 périodes pour finir à la fin de la période 21.

Par cela, nous pouvons conclure que l'intégration a un impact sur la date de début et de fin de chaque projet de la chaîne ainsi que sur la date d'achèvement. La planification sur un horizon commun pour les deux projets de façon intégrée donne plus de flexibilité sur la date d'achèvement de projet, dans le but de chercher plus d'efficacité au long de toute la chaîne d'approvisionnement. En effet, ces résultats correspondent à notre hypothèse concernant la collaboration entre les membres de la chaîne d'approvisionnement. Dans ce cas, les

entrepreneurs acceptent de retarder leurs projets d'un certain nombre de périodes si cela permet d'assurer une chaîne d'approvisionnement plus efficace avec un coût minimal. Nous allons confirmer cela en comparant les différents coûts entre les deux cas : intégré et non intégré.

4.2.2 Comparaison des coûts

Nous comparons les coûts détaillés de la CSC (Tableau 4.7) obtenus à la suite de l'exécution du modèle intégré, c'est-à-dire le cas où il y a une collaboration entre les membres de la chaîne d'approvisionnement, puis l'exécution du modèle non intégré pour le projet 1 et le projet 2 séparément, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas de collaboration.

Tableau 4.7 Comparaison des coûts: modèle intégré et modèle non intégré

	CSC intégrée	Projet 1 (1)	Projet 2 (2)	CSC non intégrée (1) + (2)	Variation
Coût des activités	950 \$	525 \$	450 \$	975 \$	2,63%
Coût des commandes	900 \$	450 \$	450 \$	900 \$	0%
Coût de production	17 600 \$	8 800 \$	8 800 \$	17 600 \$	0%
Coût de configuration	530 \$	530 \$	530 \$	1 060 \$	100,00%
Coût de transport	585 \$	293 \$	293 \$	585 \$	0%
Coût du stock	190 \$	145 \$	145 \$	290 \$	52,63%
Pénalité	- \$	- \$	- \$	- \$	0%
Récompense	- \$	- \$	- \$	- \$	0%
Production stock initial	3 200 \$	1 600 \$	1 600 \$	3 200 \$	0%
Total	23 955 \$	12 343 \$	12 268 \$	24 610 \$	2,73%

En comparant les deux cas, le coût total de la CSC est moins élevé lorsque nous décidons de collaborer avec les autres membres de la CSC que lorsqu'il n'y a pas de collaboration. Ainsi, l'optimisation du coût total de la CSC représente l'avantage du modèle MIP proposé pour intégrer l'ensemble des membres de la CSC. Dans ce cas, et avec les données présentées, nous

avons réussi à réduire le coût total de la CSC après intégration, de 2,73%, ce qui est un pourcentage significatif pour les projets de construction qui peuvent souvent coûter des millions de dollars. Pour expliquer cette variation de 2,73%, nous allons analyser les différences entre les deux cas au niveau des coûts de configuration et des coûts de stock. La différence au niveau des coûts des activités de 2,63% vient principalement du fait qu'il y a eu plus de compression d'activités dans la CSC non-intégrée, ainsi qu'il est expliqué dans la section précédente. Le coût de production est le même quel que soit le cas, il correspond au coût de la quantité de produit requise qui est toujours la même dans les différents cas étudiés.

4.2.3 Comparaison de la quantité de production

La quantité de production par période de chaque produit, requise pour les différents chantiers dans les cas avec et sans collaboration, est illustrée dans la Figure 4.14. Nous pouvons remarquer que dans la CSC non intégrée, nous avons plus de points de production que dans la CSC intégrée, ce qui explique la diminution du coût configuration dans le modèle intégré de 100%. Le coût configuration est considéré comme un coût sans valeur ajoutée qui doit être minimisé, d'où l'importance de cette intégration.

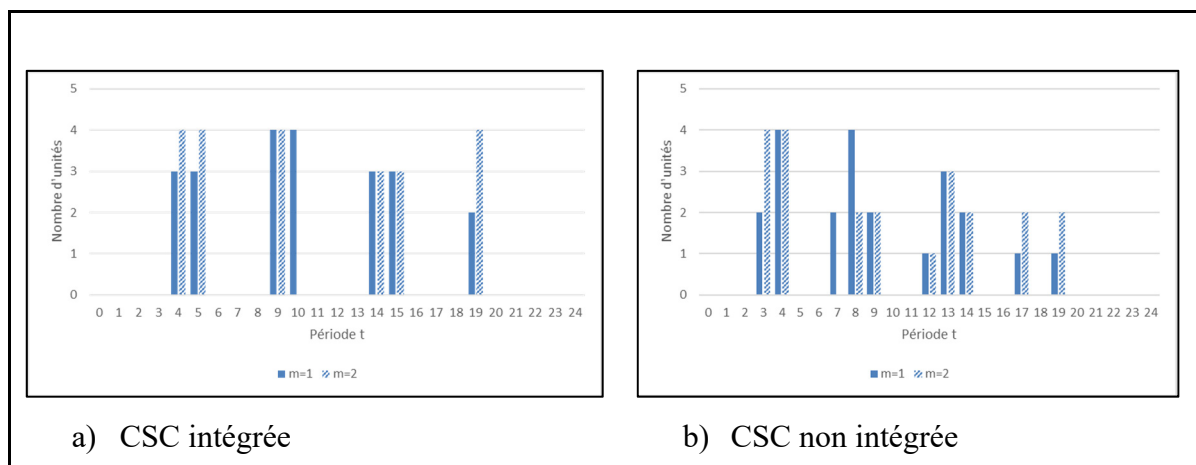


Figure 4.14 Comparaison de la production du chaque produit par période

4.2.4 Comparaison des niveaux de stock

Les niveaux de stock de chaque membre de la CSC sont illustrés dans la Figure 4.15 et la Figure 4.16.

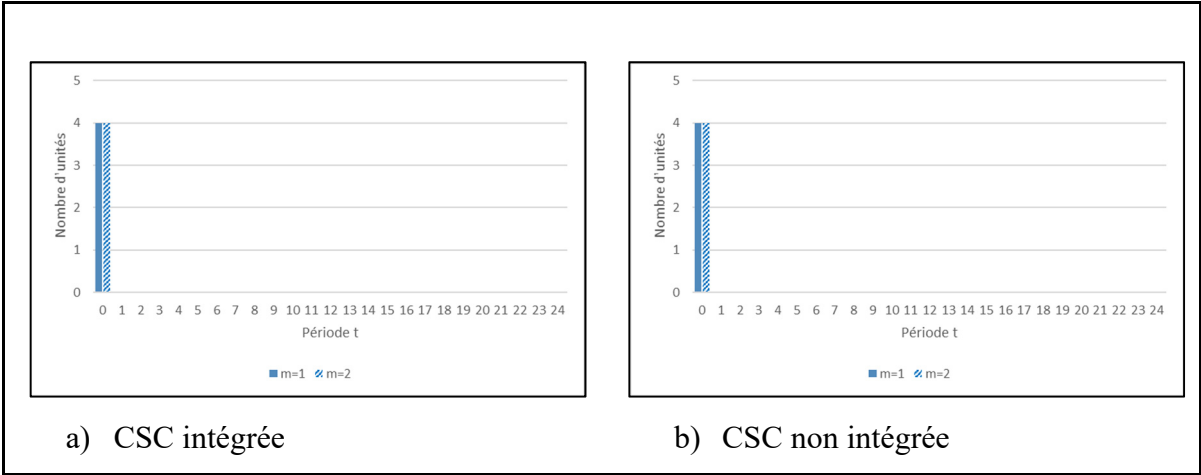


Figure 4.15 Niveau de stock dans l'usine du produit m à la période t

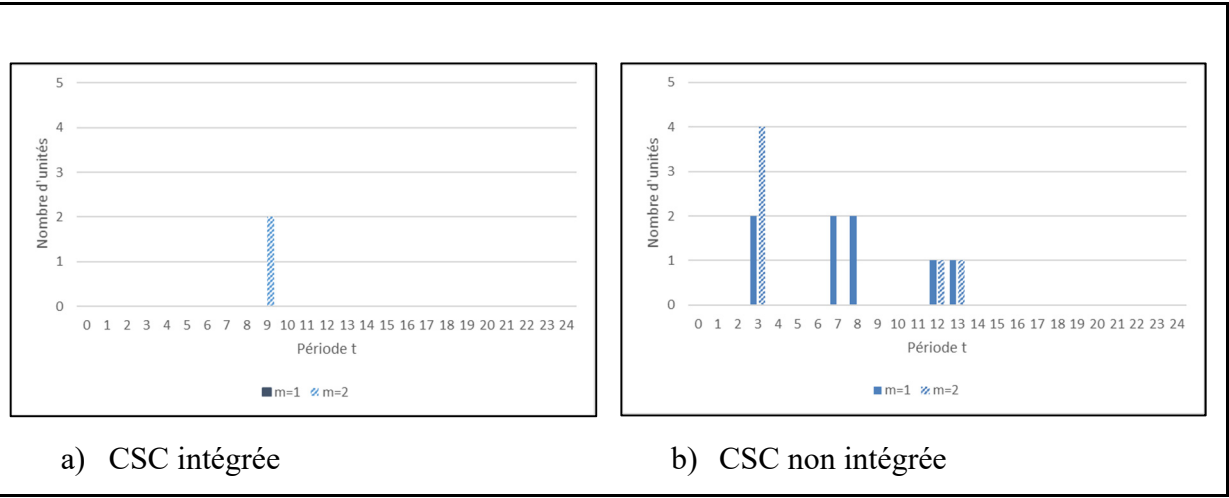


Figure 4.16 Niveau de stock dans l'entrepôt de chaque produit par période

En analysant les niveaux de stock chez chaque membre de la chaîne d’approvisionnement, nous pouvons remarquer que dans le cas de la CSC non intégrée, nous avons plus de stock au niveau de l’entrepôt pendant plusieurs périodes, contrairement à la CSC intégrée où nous avons

gardé du stock seulement pendant une période. Le niveau de stock au niveau de l'usine correspond au stock initial uniquement dans les deux cas, et le stock au niveau des sites de construction est nul dans les deux cas.

Nous avons donc également réussi avec le modèle intégré à réduire le niveau de stock le long de la chaîne, et par conséquent nous avons une variation de 52,63% dans le coût de stock dans le modèle intégré, comparé au modèle non intégré.

4.2.5 Conclusion

Pour conclure, il est évident de remarquer que lorsqu'il n'y a pas de collaboration ni de partage d'informations entre les acteurs de la CSC, le coût configuration est plus élevé, car il n'y a pas d'agrégation au niveau de la production, nous traitons les demandes de chaque chantier séparément, parce que nous n'avons pas une idée sur la demande d'un chantier en traitant la demande d'un autre. De plus, le coût de stock est plus élevé parce que lorsqu'un acteur essaie de minimiser son coût d'inventaire, ses coûts sont transférés aux autres membres de la chaîne, ce qui entraîne un coût total de stock plus élevé pour l'ensemble de la CSC non intégrée. Finalement, quand la planification des projets se fait simultanément sur le même horizon temporel, nous pouvons essayer de synchroniser les dates de début des activités afin de synchroniser la production et la distribution de produits.

D'où l'importance du modèle MIP proposé et l'importance de l'intégration, de la collaboration et du partage d'informations entre les différents acteurs de la chaîne d'approvisionnement dans l'industrie de construction, surtout avec le développement de plusieurs technologies qui facilitent la coordination et la collaboration.

CHAPITRE 5

PROPOSITION D'UNE MÉTHODE DE RÉOLUTION

5.1 Décomposition du modèle

5.1.1 Approche

Le modèle proposé appartient à la classe des problèmes NP-difficile puisqu'il s'agit d'une extension du PSMO, qui a été prouvé comme étant un problème NP-difficile par Hassanzadeh et al. (2009). Ainsi, la solution optimale peut ne pas être obtenue par des algorithmes exacts pour les larges instances. Par conséquent, des méthodes heuristiques sont nécessaires pour résoudre les problèmes larges vu la complexité de calcul. Dans cette étude nous proposons une méthode de décomposition du modèle en deux sous-problèmes qui sont, évidemment, de taille plus petite que le modèle intégré. Avec cette approche, nous voulons trouver la limite supérieure de la fonction objectif qui correspond au coût total dans le pire des cas, le cas où nous ne prenons pas l'intégration de l'ordonnancement du projet et la commande de matériaux.

5.1.2 Formulation

5.1.2.1 Premier sous-problème

Il s'agit de la planification des activités des différents projets sous leurs contraintes de précedence et la durée des activités.

Fonction objectif :

Elle comprend les coûts des activités, la valeur de la pénalité et de la récompense.

$$\text{Coût} = \text{Coût des activités (AC)} + \text{Récompense et pénalité (RPP)}$$

Contraintes du premier sous-problème :

Contraintes liées aux activités : Contraintes (3.7) – (3.13)

5.1.2.2 Deuxième sous-problème

Il s'agit de la planification des commandes, la production, le transport et la gestion des stocks de produits, tout en connaissant la date de début de chaque activité de chaque projet ζ_{ijt} , résultat du premier sous-problème et utilisé dans ce deuxième sous-problème comme une donnée.

Fonction objectif :

Elle comprend le coût de production, coût de commande, coût de transport et coût de stock chez le fabricant, l'entrepôt ainsi que les chantiers.

Coût total = Coût de production (MC) + Coût de passation de commandes (OC) +
Coût de transport (TC) + Coût de possession de stocks (IC)

Contraintes du deuxième sous-problème :

Contrainte liée à la passation de commande, contraintes liées à l'équilibre des niveaux de stock, contraintes liées aux capacités : Contraintes (3.14) – (3.24)

La contrainte (3.19), ici (5.1) est la seule contrainte qui lie le premier sous-problème au deuxième.

$$I_{mit}^c = I_{mi(t-1)}^c + \varepsilon_{mit}^{wc} - \sum_{j=1}^J \delta_{mij} \zeta_{ijt}, \quad m = 1, \dots, M, i = 1, \dots, I, \quad (5.1)$$

$$t = 1, \dots, H - 1$$

Le paramètre ζ_{ijt} dans ce cas n'est plus une variable de décision, mais plutôt une donnée, et donc le terme $\delta_{mij} \zeta_{ijt}$ est une constante qui représente la demande de chaque produit pour chaque activité du chaque projet à la période t.

Nous pouvons définir d_{mit} la demande du produit m pour le projet i à la période t, telle que :

$$d_{mit} = \delta_{mij} \zeta_{ijt}, \quad m = 1, \dots, M, \quad i = 1, \dots, I, \quad t = 0, \dots, H \quad (5.2)$$

5.1.3 Résultats de l'exécution et comparaison avec le modèle intégré

Nous allons considérer le même exemple numérique présenté dans le chapitre précédent pour pouvoir comparer les résultats des deux scénarios, le modèle décomposé et le modèle intégré.

5.1.3.1 Résultats du premier sous-problème

Le résultat de ce premier sous-problème est une planification des activités des deux projets.

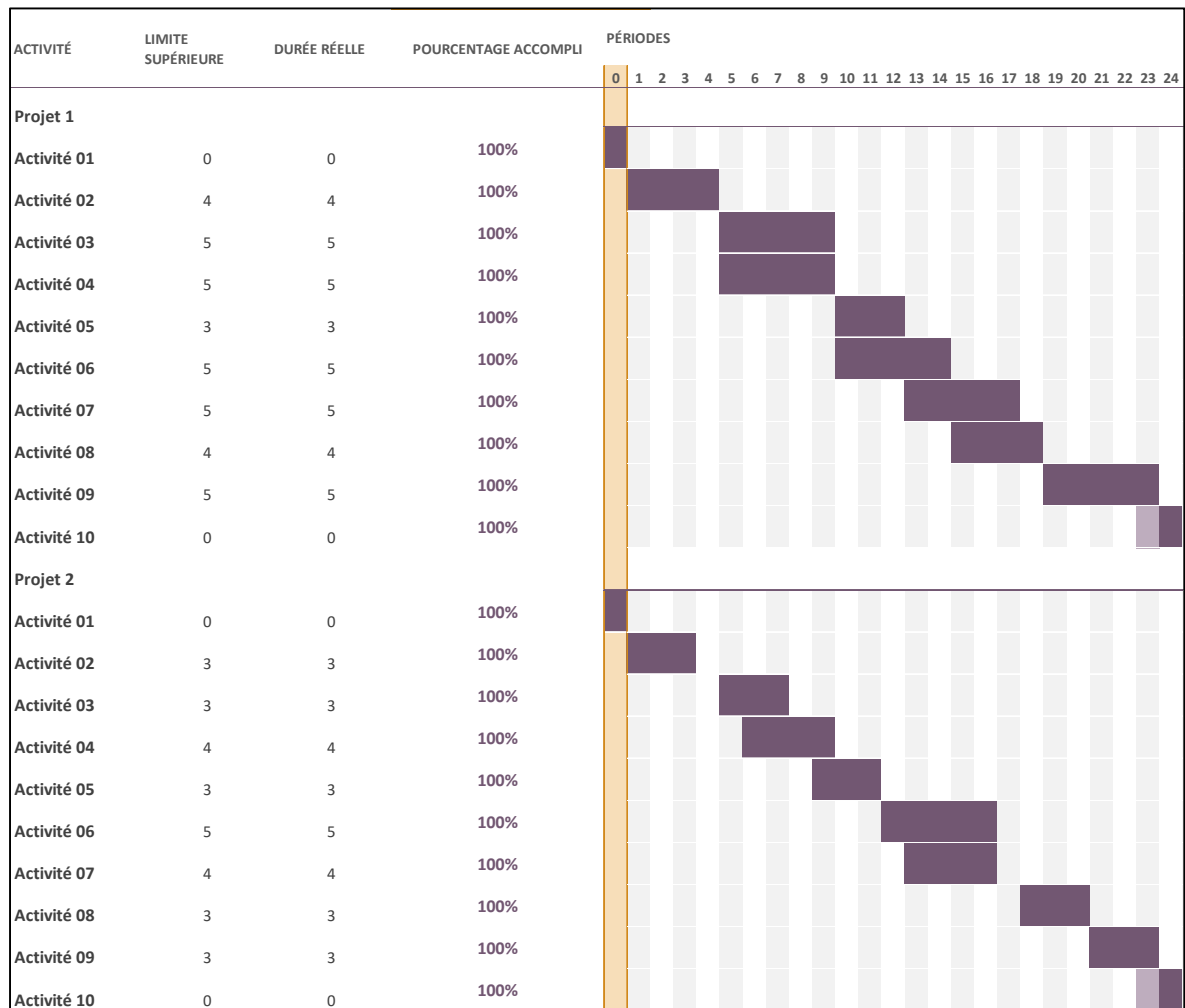


Figure 5.1 Planification des projets dans le cas de décomposition

Dans ce cas, il n'y a pas eu de compression, ni au niveau du projet 1, ni au niveau du projet 2 (voir Figure 5.1). Rappelons que dans le cas du modèle intégré, il y a eu compression au niveau de l'activité 2 dans le projet 1.

Nous pouvons remarquer que le projet 1 a respecté sa date d'échéance et il a été achevé à la fin de la période 23 comme dans le modèle intégré.

Cependant, dans le cas du modèle intégré, le projet 2 a été retardé de 3 périodes pour finir à la fin de la période 21 alors que sa date d'échéance est la période 18, et dans le cas de décomposition il a été retardé encore davantage pour finir à la fin de la période 23.

Nous pouvons expliquer cela par le fait que la fonction objectif est indépendante de la date de début et de fin des projets ; comme la pénalité et la récompense, ils gardent toujours la valeur nulle, mais elle est aussi indépendante des commandes, de la planification de production et de transport. Donc, il n'y a pas intérêt à finir les projets plus tôt, étant donné qu'il n'y a aucune contrainte empêchant de finir les deux projets à la fin de l'horizon de planification, et la solution optimale à ce sous-problème est la solution qui minimise seulement le coût des activités.

5.1.3.2 Résultats du deuxième sous-problème

Une fois la planification des activités générée et la date de début et de fin de chaque activité déterminée, nous pouvons en premier lieu tracer d_{mit} , le profil de la demande en fonction du temps pour chaque chantier (Figure 5.2).

Nous pouvons aussi tracer le profil de la demande pour chaque produit par période pour chaque chantier dans le cas du modèle intégré, pour pouvoir observer l'impact de la décomposition sur la demande au niveau des sites (Figure 5.3).

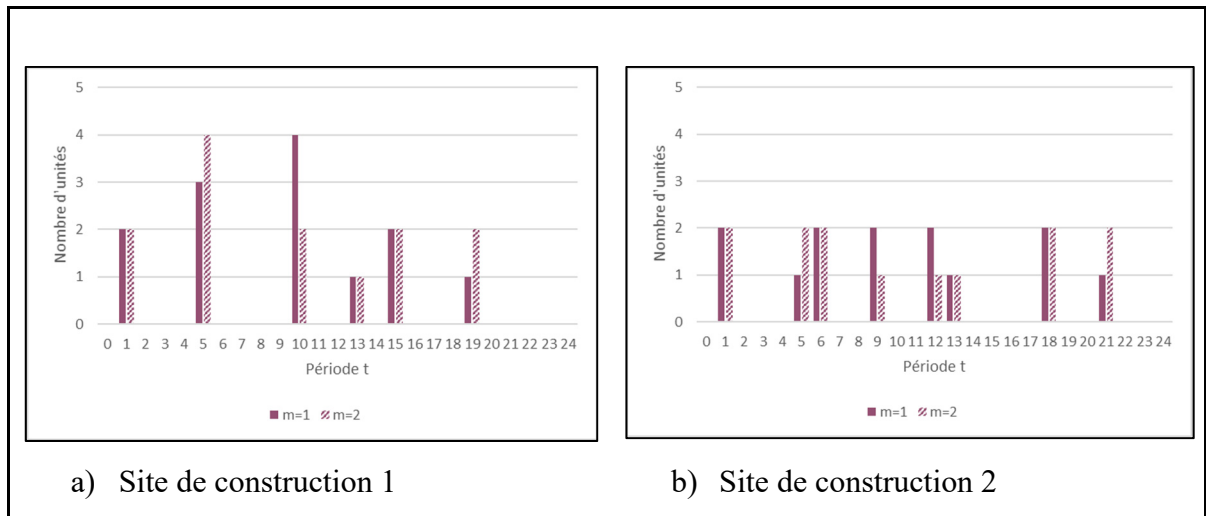


Figure 5.2 Profil de la demande de chaque produit dans le modèle décomposé

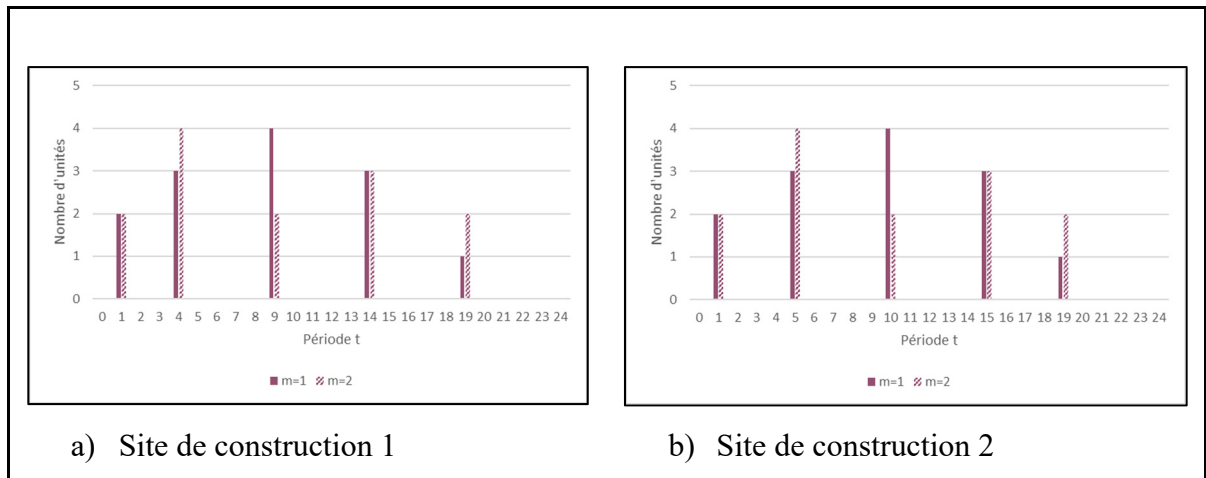


Figure 5.3 Profil de la demande de chaque produit dans le modèle intégré

En comparant les deux profils, nous pouvons remarquer qu'il y a plus de points de demande au niveau des deux chantiers dans le cas du modèle décomposé que dans le cas du modèle intégré.

Maintenant, nous pouvons exécuter le deuxième sous-problème et générer les résultats liés aux commandes (Figure 5.4), et les comparer avec les résultats du modèle intégré (Figure 5.5).

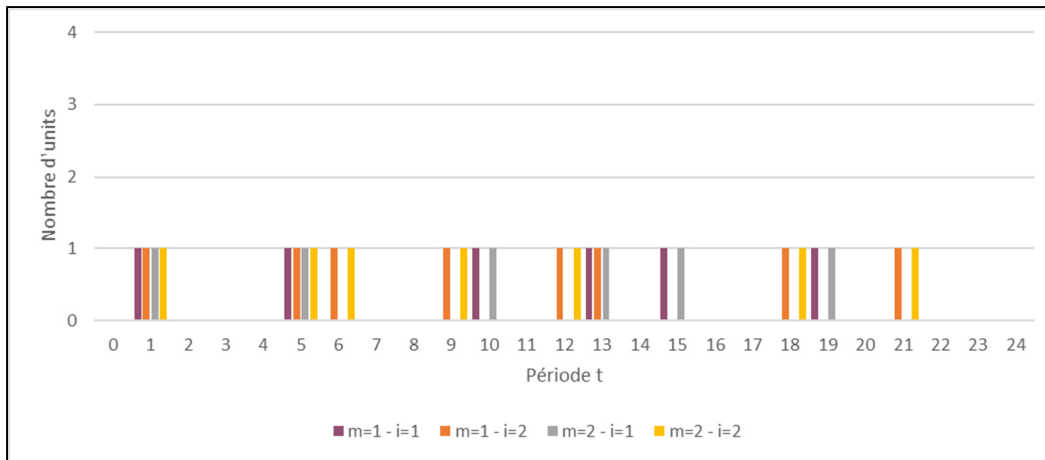


Figure 5.4 Nombre de commandes: modèle décomposé

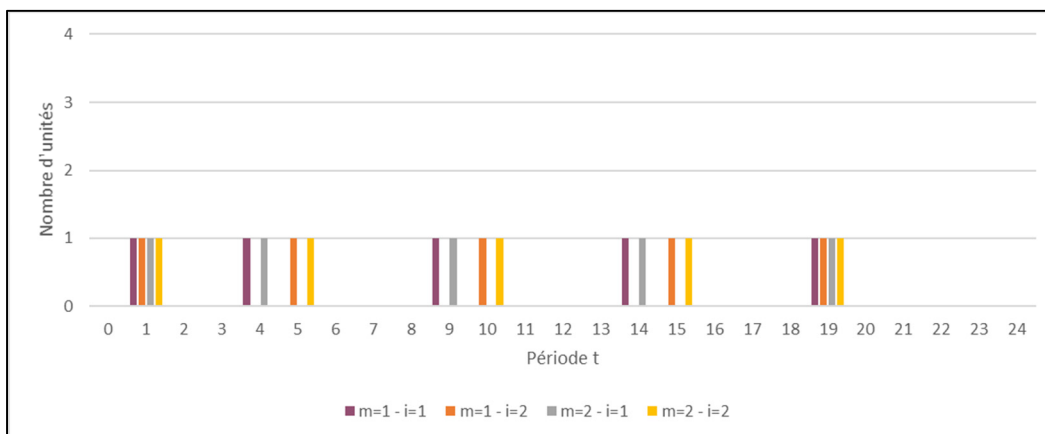


Figure 5.5 Nombre de commandes modèle intégré

Nous pouvons remarquer qu'avec le modèle décomposé nous avons plus d'ordres de commandes (27 commandes pour le modèle décomposé et 20 commandes pour le modèle intégré), ceci étant dû au grand nombre de points de demande de produit dans chaque site de construction, comme montré dans la section précédente.

Au niveau de l'usine, le niveau de stock est le même dans les deux cas et correspond au stock initial (Figure 5.6). Cependant, au niveau de l'entrepôt, il y a eu beaucoup de stockage pendant différentes périodes dans le cas de la décomposition (Figure 5.7). Finalement, le modèle évite toujours de stocker sur les sites de construction afin d'éviter la congestion et les coûts élevés

du stockage dans le chantier. Nous avons gardé seulement une unité pendant une période sur le chantier 2 dans le cas de la décomposition (Figure 5.8), et aucun stockage tout le long du projet au niveau du chantier 1.

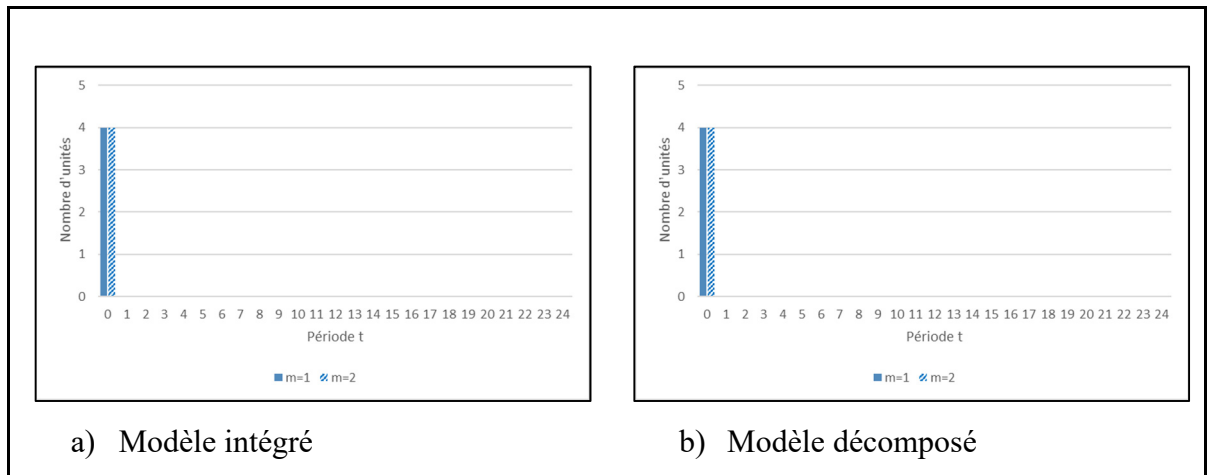


Figure 5.6 Comparaison du niveau de stock dans l'usine

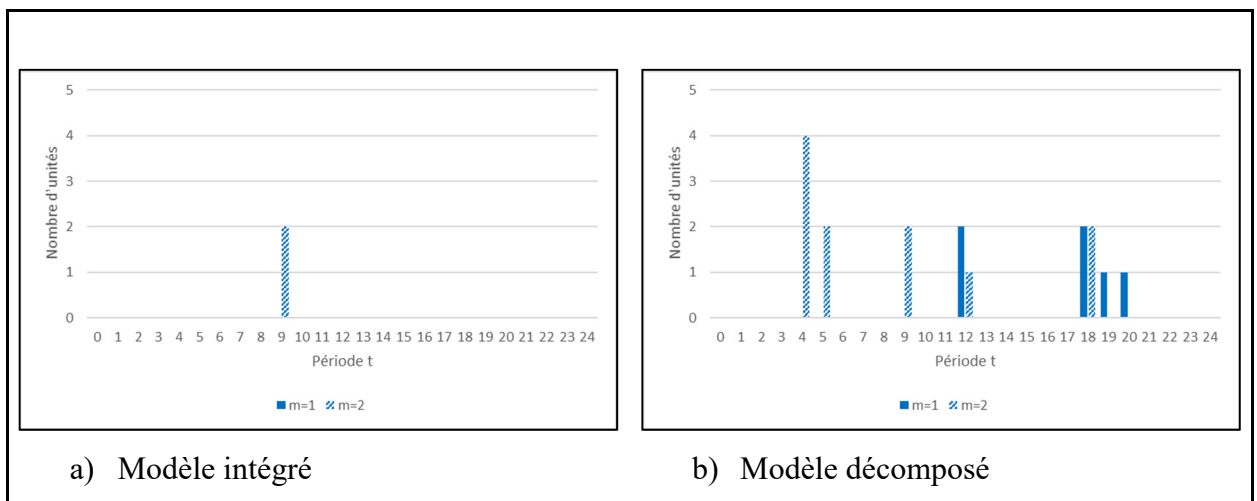


Figure 5.7 Comparaison du niveau de stock dans l'entrepôt

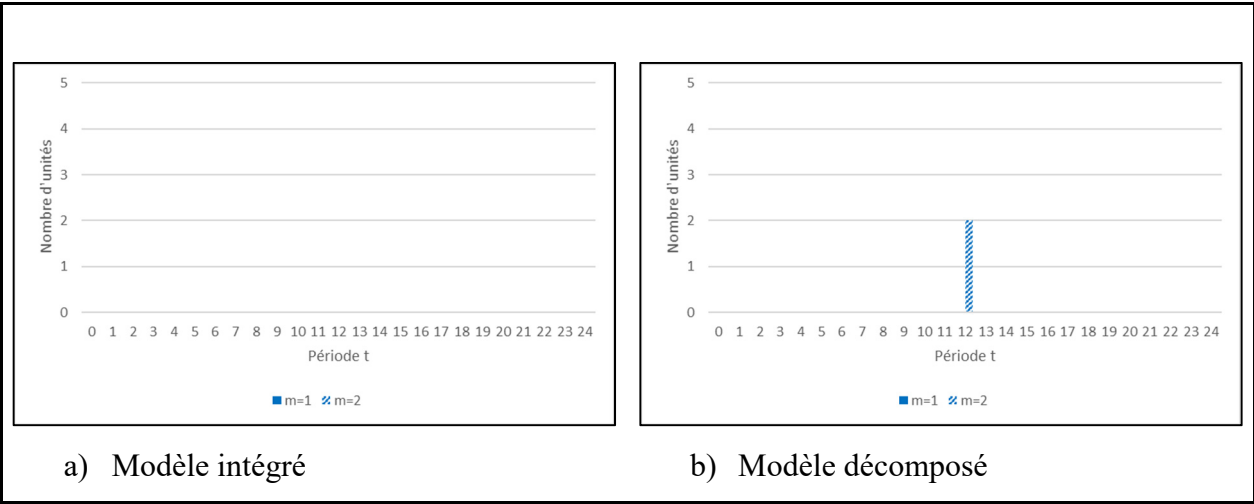


Figure 5.8 Planification des activités avec le modèle modifié

5.1.3.3 Comparaison et interprétation des coûts

Ainsi, évidemment, avec la méthode de décomposition nous avons un coût total pour l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement plus élevé. La variation dans ce cas est de 1,94% (voir le Tableau 5.1). Cette variation est due aux coûts des commandes, étant donné qu'avec la décomposition nous avons 27 commandes alors que dans le modèle intégré, il y avait 20 commandes au total. Ce qui explique la variation de 35% au niveau de ce coût. Ensuite, cette variation est due principalement au coût de possession de stock, une variation de 73,68%. Comme nous avons pu remarquer dans la section précédente, il y a eu beaucoup de stock au niveau de l'entrepôt pendant plusieurs périodes. Finalement, il y a une légère variation négative au niveau du coût des activités qui est dû aux non-compressions des activités dans le cas de la décomposition, et une légère variation positive au niveau du coût de configuration, car il y a eu une période de production de plus avec la décomposition.

Tableau 5.1 Comparaison des coûts du modèle intégré et du modèle décomposé

	CSC intégrée	Premier sous- problème (1)	Deuxième sous- problème (2)	CSC décomposée (1) + (2)	Variation
Coût des activités	950 \$	930 \$	- \$	930 \$	-2,11%
Coût des commandes	900 \$	- \$	1215 \$	1215 \$	35%
Coût de production	17 600 \$	- \$	17 600 \$	17 600 \$	0%
Coût de configuration	530 \$	- \$	560 \$	560 \$	5,66%
Coût de transport	585 \$	- \$	585 \$	585 \$	0%
Coût du stock	190 \$	- \$	330 \$	330 \$	73,68%
Pénalité	- \$	- \$	- \$	- \$	0%
Récompense	- \$	- \$	- \$	- \$	0%
Production stock initial	3 200 \$	- \$	3 200 \$	3 200 \$	0%
Total	23 955 \$	930 \$	23 490 \$	24 420 \$	1,94%
Nombre de commandes	20	-	27	27	35%

Cependant, il est clair qu'avec la décomposition, il n'est pas possible d'obtenir les résultats de la solution optimale. En effet, dans la solution optimale, il y a eu une compression au niveau du projet 1 et les résultats en matière de coût et de nombre de commandes sont obtenus en conséquence. Dans le modèle décomposé, il n'y a pas d'intérêt à faire la même compression comme nous ne planifions pas les commandes simultanément avec l'ordonnancement.

Donc, il est plus logique de comparer les résultats du modèle décomposé avec les résultats du même modèle, mais en le forçant à effectuer la même compression. Les résultats du modèle sans compression sont présentés dans la section 4.1.3.4, et le nombre de commandes correspondant est de 22 commandes. La variation dans ce cas en matière de coûts est de 1,64% et non pas 1,94%.

5.1.4 Conclusion

La variation dans ce cas est de 1,64%, qui représente une valeur relativement élevée quand nous traitons des projets de construction qui sont généralement très coûteux. Il est évident d'avoir une augmentation au niveau du coût total, car nous avons planifié les activités des projets sans prendre en compte la planification des commandes, c'est-à-dire que nous avons planifié le début de chaque activité sans prendre en compte la disponibilité des matériaux et sans aller chercher des compromis entre les coûts de commandes, le coût de stock et le coût des activités, ainsi que l'agrégation de la production et du transport. Par conséquent, nous devons trouver une façon d'améliorer cet écart pour nous approcher de la solution optimale.

Comme la première partie de l'heuristique correspond à la partie de l'ordonnancement du projet et que c'est elle qui va affecter le plan de commandes, nous allons tout d'abord nous focaliser sur cette partie en apportant des modifications au niveau de la fonction objectif et des contraintes, afin d'avoir plus de flexibilité au niveau de la planification des activités et de pouvoir tester plusieurs plans de commandes en fonction de plusieurs planifications d'activités qui vont être générées. Ensuite, nous allons nous focaliser sur la deuxième partie, le deuxième sous-problème, pour faire une analyse de sensibilité sur les coûts de commandes.

Dans la prochaine section, nous allons expliquer l'approche qui va être prise en compte, montrer les changements apportés au modèle et analyser les résultats de l'implémentation du modèle ainsi que les résultats de l'analyse de sensibilité des paramètres du modèle.

5.2 Amélioration des résultats de la décomposition

5.2.1 Motivation et approche

Avec le premier modèle proposé dans le chapitre 3, le modèle intégré, nous avons pu avoir des résultats satisfaisants à la suite de l'implémentation du modèle au bout de quelques secondes, ainsi qu'il est montré dans le chapitre 4. L'exemple qui a été utilisé pour illustrer l'utilisation du modèle est considéré comme réseau non très complexe. Il s'agit de deux projets de construction indépendants, mais identiques, qui sont représentés par un réseau simple

comprenant dix activités, dont deux activités sont fictives, et requièrent deux types de produits modulaires différents.

Dans la réalité, nous allons nous retrouver face à plus de deux projets qui comprennent plus de dix activités. L'utilisation du modèle proposé dans de tels problèmes va présenter un défi au niveau du temps de résolution et de la qualité des résultats, étant donné la complexité du réseau qui peut y avoir lieu et le fait que le modèle proposé appartient à la classe des problèmes NP-difficiles ; il dépend donc du nombre de variables, des contraintes du problème et de l'horizon de planification. Ainsi, nous devons trouver une solution plus flexible et une méthode pour réduire de manière significative le temps de résolution du problème, sans affecter la qualité de la solution. Par conséquent, nous avons présenté dans le chapitre 5 une heuristique qui repose sur la décomposition du problème en deux sous-problèmes. Nous avons pu obtenir des résultats au bout de quelques secondes, cependant la solution optimale représente une variation de 1,94% par rapport à la solution optimale obtenue avec le modèle intégré. Nous cherchons donc, dans ce chapitre, à améliorer cet écart et à nous approcher davantage de la solution du modèle intégré.

Nous allons, tout d'abord, apporter des modifications au modèle initial proposé, et plus précisément dans la partie de l'ordonnancement. Le changement va avoir lieu au niveau de la fonction objectif et des contraintes liées aux activités, et plus particulièrement des contraintes liées à la période d'achèvement de chaque activité de chaque projet. Ensuite, nous allons apporter les mêmes modifications au niveau du premier sous-problème de notre heuristique.

En ce qui concerne les modifications au niveau de l'ordonnancement, nous allons limiter la variable de décision, qui donne la date de fin de chaque activité, entre sa date de fin au plus tôt et sa date de fin au plus tard. En calculant la fin au plus tôt et la fin au plus tard pour chaque activité, nous parvenons à éliminer un nombre considérable de variables binaires, ce qui va réduire le nombre total de variables de décision, le nombre de contraintes, et par conséquent, le temps de résolution du modèle. Cette approche est d'une grande importance pratique, car

elle permet de réduire la taille du modèle MIP, ce qui nous permet de résoudre des problèmes plus importants.

5.2.2 Modèle modifié

Ajout de nouveaux paramètres :

e_{ij} Date de fin au plus tôt de l'activité j du projet i .

l_{ij} Date de fin au plus tard de l'activité j du projet i .

Changement au niveau de la fonction objectif :

Le changement sera au niveau de la fonction de coût pour la récompense / pénalité pour l'achèvement en avance / tardif du projet. RPP devient :

$$RPP = \sum_{i=1}^I \left(\sum_{t=d_i+1}^H p_i(t - (d_i + 1)) \omega_{in_i t} \right. \\ \left. - \sum_{t=e_{ij}+1}^{d_i+1} r_i((d_i + 1) - t) \omega_{in_i t} \right) \quad (5.3)$$

Changement au niveau des contraintes : Le changement est au niveau des contraintes liées aux activités et plus précisément les contraintes où nous avons ϖ_{ijt} .

$$\sum_{t=e_{ik}+1}^{t=l_{ik}+1} t \varpi_{ikt} + \lambda_{ij} \leq \sum_{t=e_{ij}+1}^{l_{ij}+1} t \varpi_{ijt}, \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J, \quad (5.4)$$

$$\forall k \in P_{ij}$$

$$\sum_{t=e_{ij}+1}^{t=e_{ij}+1} \varpi_{ijt} = 1, \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 2, \dots, n_i \quad (5.5)$$

$$\sum_{t=0}^H t\zeta_{ijt} + \lambda_{ij} = \sum_{t=e_{ij}+1}^{t=e_{ij}+1} t\varpi_{ijt}, \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 2, \dots, n_i \quad (5.6)$$

5.2.3 Validation du modèle après les changements apportés

Dans un premier lieu, nous allons comparer les résultats de l'implémentation du modèle intégré avec les résultats du modèle après les changements apportés. Nous devons trouver la même solution optimale pour valider les changements que nous avons apportés, car nous ne devons pas affecter la qualité de la solution optimale. Pour la suite de l'analyse, nous allons considérer le modèle intégré modifié. Afin de valider ce modèle et afin d'illustrer son applicabilité, nous considérons le même exemple numérique présenté dans le chapitre 4 afin de pouvoir comparer les résultats des deux modèles, le premier modèle proposé et le même modèle avec les nouveaux paramètres.

En revanche, nous devons, tout d'abord, calculer les valeurs des deux nouveaux paramètres qui sont introduits pour la formulation de ce nouveau modèle à savoir e_{ij} la date de fin au plus tôt et date de fin au plus tard l_{ij} pour chaque activité de chaque projet. L'utilisation de e_{ij} et l_{ij} permet de réduire considérablement la taille du modèle MIP.

5.2.3.1 Calcul de e_{ij} et l_{ij}

La date de fin au plus tôt de l'activité j du projet i e_{ij} est calculée en supposant que le projet commence à la période zéro et que la durée de chaque activité est égale à sa limite inférieure (temps de compression) v_{ij} . La date de fin au plus tard de l'activité j du projet i l_{ij} est calculée en supposant que H est la date de fin au plus tard du projet et que la durée de chaque activité est égale à sa limite inférieure (temps de compression) v_{ij} . Les valeurs résultantes de e_{ij} et l_{ij} sont présentées dans le Tableau 5.2. La date de fin au plus tôt ainsi que la date de fin au plus

tard sont utilisées pour les calculs intermédiaires. Les contraintes de précedence ont été évidemment prises en compte lors de ce calcul.

Tableau 5.2 Calcul de e_{ij} et l_{ij}

i	j	Prédécesseur	Limite supérieure	Limite inférieure	Délai de début le plus tôt	Délai d'achèvement le plus tôt	Délai d'achèvement le plus tardif	Délai de début le plus tôt
1	1	-	0	0	0	0	0	0
	2	1	4	2	1	3	12	10
	3	1	5	1	3	4	13	12
	4	2	5	1	3	4	14	13
	5	3	3	1	4	5	15	14
	6	4	5	3	4	7	18	15
	7	5	5	3	5	8	21	18
	8	6	4	2	7	9	23	21
	9	7-8	5	1	9	10	24	23
	10	9	0	0	10	10	24	24
2	1	-	0	0	0	0	0	0
	2	1	3	2	1	3	10	8
	3	1	3	1	3	4	11	10
	4	2	4	2	3	5	13	11
	5	3	3	2	4	6	15	13
	6	4	5	3	5	8	18	15
	7	5	4	3	6	9	21	18
	8	6	3	2	8	10	23	21
	9	7-8	3	1	10	11	24	23
	10	9	0	0	11	11	24	24

5.2.3.2 Résultats et comparaison avec le premier modèle

L'exécution du modèle modifié génère la même solution que le premier modèle en matière de coûts (Tableau 4.4). C'est donc une solution optimale au problème ; ainsi, notre nouveau modèle est valide et nous pouvons utiliser cette version modifiée pour améliorer notre heuristique. Cependant, il y a une légère différence au niveau de l'ordonnancement des projets et plus précisément au niveau du projet 2 que nous allons analyser ci-dessous. Nous générons la planification des activités pour les deux projets avec le nouveau modèle (Figure 5.9).



Figure 5.9 Planification des activités avec le modèle modifié

Pour le projet 1, il n’y a aucune différence, cependant, il y a une petite différence au niveau de la date de début des activités 3 et 4 du projet 2, ici les deux projets commencent à la période 6 et avec le premier problème ces deux activités commencent à la période 5. Après analyse du plan de commandes, de production, de transport, des niveaux des stocks, le changement dans la date de début de ces deux activités n’a affecté que le plan de production et le plan de transport des produits requis pour les exécuter, et cela n’avait pas retardé la fin du projet, ni le nombre de commandes, ni les coûts.

5.2.4 Résultats de l'exécution du modèle décomposé avec les changements

Maintenant, nous allons comparer les résultats de l'implémentation du modèle intégré modifié avec les résultats du modèle décomposé modifié. Nous allons donc apporter les mêmes changements au niveau de la fonction objectif ainsi que des contraintes dans la décomposition, et plus précisément dans le premier sous-problème. Ci-dessous les résultats de l'exécution du modèle en matière de coûts et de nombre de commandes (Tableau 5.3).

Tableau 5.3 Coûts et nombre de commandes du nouveau modèle décomposé

	CSC intégrée	Premier sous- problème (1)	Deuxième sous- problème (2)	CSC décomposée (1) + (2)	Variation
Coût des activités	950 \$	930 \$	- \$	930 \$	-2,11%
Coût des commandes	900 \$	- \$	1215 \$	1215 \$	35%
Coût de production	17 600 \$	- \$	17 600 \$	17 600 \$	0%
Coût de configuration	530 \$	- \$	610 \$	610 \$	15,09%
Coût de transport	585 \$	- \$	585 \$	585 \$	0%
Coût du stock	190 \$	- \$	285 \$	285 \$	50%
Pénalité	- \$	- \$	- \$	- \$	0%
Récompense	- \$	- \$	- \$	- \$	0%
Production stock initial	3 200 \$	- \$	3 200 \$	3 200 \$	0%
Total	23 955 \$	930 \$	23 495 \$	24 425 \$	1.96%
Nombre de commandes	20	-	27	27	35%

La variation par rapport à la solution optimale a augmenté de 0,02% et le nombre de commandes est resté le même, à savoir 27 commandes.

Dans le Tableau 5.4, nous comparons les résultats du modèle intégré sans et avec compression, et décomposé sans et avec compression :

Tableau 5.4 Comparaison des résultats de la décomposition

	CSC intégrée compression	CSC intégrée sans compression	Décomposition	Décomposition $e_{ij} l_{ij}$	Décomposition $e_{ij} l_{ij}$ compression	Décomposition $e_{ij} l_{ij}$ sans compression
H	24	24	24	24	24	24
$l_{ij} (i=1, j=10)$	24	24	24	24	24	24
$l_{ij} (i=2, j=10)$	24	24	24	24	24	24
Coût des activités	950 \$	930 \$	930 \$	930 \$	950 \$	930 \$
Coût des commandes	900 \$	990 \$	1 215 \$	1 215 \$	1 170 \$	1 125 \$
Coût de production	17 600 \$	17 600 \$	17 600 \$	17 600 \$	17 600 \$	17 600 \$
Coût de configuration	530 \$	530 \$	560 \$	610 \$	560 \$	610 \$
Coût de transport	585 \$	585 \$	585 \$	585 \$	585 \$	585 \$
Coût du stock	190 \$	190 \$	330 \$	285 \$	330 \$	235 \$
Pénalité	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$
Récompense	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$
Production stock initial	3 200 \$	3 200 \$	3 200 \$	3 200 \$	3 200 \$	3 200 \$
Total	23 955 \$	24 025 \$	24 420 \$	24 425 \$	24 395 \$	24 285 \$
Nombre de commandes	20	22	27	27	26	25

Le résultat de décomposition le plus proche de la solution optimale est la solution du modèle décomposé avec les nouveaux paramètres et sans compression du calendrier.

5.3 Analyse de sensibilité au niveau de la décomposition

L'objectif de cette partie est de présenter des analyses plus détaillées concernant la décomposition sur l'exemple d'application. Ces analyses aident à comprendre le comportement du modèle par rapport au changement de valeur de quelques paramètres. Maintenant que nous avons décomposé le problème et ajouté les deux paramètres e_{ij} et l_{ij} pour réduire la taille du problème, nous pouvons effectuer une analyse de sensibilité des changements des paramètres principaux du problème, à savoir les deux nouveaux paramètres et le coût de commande.

5.3.1 Changement de la valeur de fin au plus tard des activités

Dans cette partie, nous allons jouer avec les valeurs de l_{ij} des deux projets pour jouer sur la flexibilité au niveau des intervalles de planification de chaque activité, ainsi qu'avec la valeur H qui définit la taille de l'horizon de planification afin de voir l'impact sur le calendrier, le plan de commandes et les coûts. Bien évidemment, nous ne pouvons pas évaluer toutes les combinaisons possibles. Dans les annexes (ANNEXE V), nous présentons les premiers résultats en matière de coûts et de nombre de commandes en fonction de la valeur de l_{ij} et H . Nous avons commencé en changeant les valeurs de l_{ij} pour le projet 2 entre sa valeur de chemin critique (19) et la valeur du chemin critique du projet 1 qui a le chemin critique le plus long (24), qui est aussi la valeur de H .

D'après ces résultats, nous choisissons la valeur de l_{ij} du projet 2 qui a donné le coût le plus bas. Ensuite, nous avons ainsi fixé la valeur de l_{ij} pour le projet 2 à cette valeur (21) et nous avons joué sur la valeur de l_{ij} pour le projet 1 et la valeur de H . Ci-dessous les résultats de l'exécution (Tableau 5.5).

Tableau 5.5 Résultats à la suite du changement de l_{ij}

H	25	26	27	28	29	30
l_{ij} (i=1,j=10)	25	26	27	28	29	30
l_{ij} (i=2,j=10)	21	21	21	21	21	21
Coût des activités	930 \$	930 \$	930 \$	930 \$	930 \$	930 \$
Coût des commandes	1 125 \$	1 080 \$	1 080 \$	1 125 \$	1 215 \$	1 080 \$
Coût de production	17 600 \$	17 600\$	17 600 \$	17 600 \$	17 600 \$	17 600 \$
Coût de configuration	480\$	510 \$	510 \$	560 \$	560\$	590 \$
Coût de transport	585 \$	585 \$	585 \$	585 \$	585 \$	585 \$
Coût du stock	380 \$	280 \$	260 \$	390 \$	345 \$	270 \$
Pénalité	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$
Récompense	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$
Production stock initial	3 200 \$	3 200 \$	3 200 \$	3 200 \$	3 200 \$	3 200 \$
Total	24 300 \$	24 185 \$	24 165 \$	24 390 \$	24 435 \$	24 255 \$
Nombre de commandes	25	24	24	25	27	24

Nous trouvons finalement une solution proche de la solution optimale pour une valeur de H égale à 27, l_{ij} pour l'activité 10 du projet 1 égale à 27 et l_{ij} pour l'activité 10 du projet 2 égale à 21. Dans ce cas, nous avons obtenu 24 commandes au lieu de 27 commandes pour la valeur de H qui est égale à 24, et l_{ij} pour l'activité 10 du projet 1 et le projet 2 égale à 24, et dans la solution optimale nous avons 20 commandes pour le modèle sans compression et 22 commandes pour le modèle avec compression ; la variation a donc diminué de façon marquée.

Pour améliorer ces résultats, il faut regarder le plan de commandes, essayer d'agréger quelques commandes pour réduire leurs nombres et les coûts qui en découlent, ensuite changer la planification des activités et évaluer les coûts. Cela demandera le développement d'une heuristique ou métaheuristique pour ce faire, et pour pouvoir couvrir toutes les possibilités d'ordonnancement et de plans de commandes afin d'obtenir une solution optimale ou quasi optimale, mais cela ne rentre pas dans le cadre de ce projet.

5.3.2 Augmentation du coût de commande par produit

Actuellement, le coût d'une commande par produit est de 45,00 \$. Nous allons augmenter ce coût afin d'analyser l'impact de son augmentation sur les coûts et le nombre des commandes. Cette augmentation peut être interprétée comme une pénalité fictive sur le nombre de commandes, donc elle pourra être déduite au cours du calcul du coût total en fonction du nombre de commandes par produit. Nous allons augmenter le coût de commande par tranches de 5,00 \$ jusqu'à l'obtention du nombre de commandes de la solution optimale ou au moins de façon à nous en approcher.

Ci-dessous sont exposées trois figures qui montrent l'impact de cette augmentation sur le nombre de commandes, le coût total, et ensuite une comparaison de l'impact sur le coût de stock, le coût de configuration et le coût de commande est présentée.

D'après la Figure 5.10, le nombre de commandes diminue avec l'augmentation du coût d'une commande.

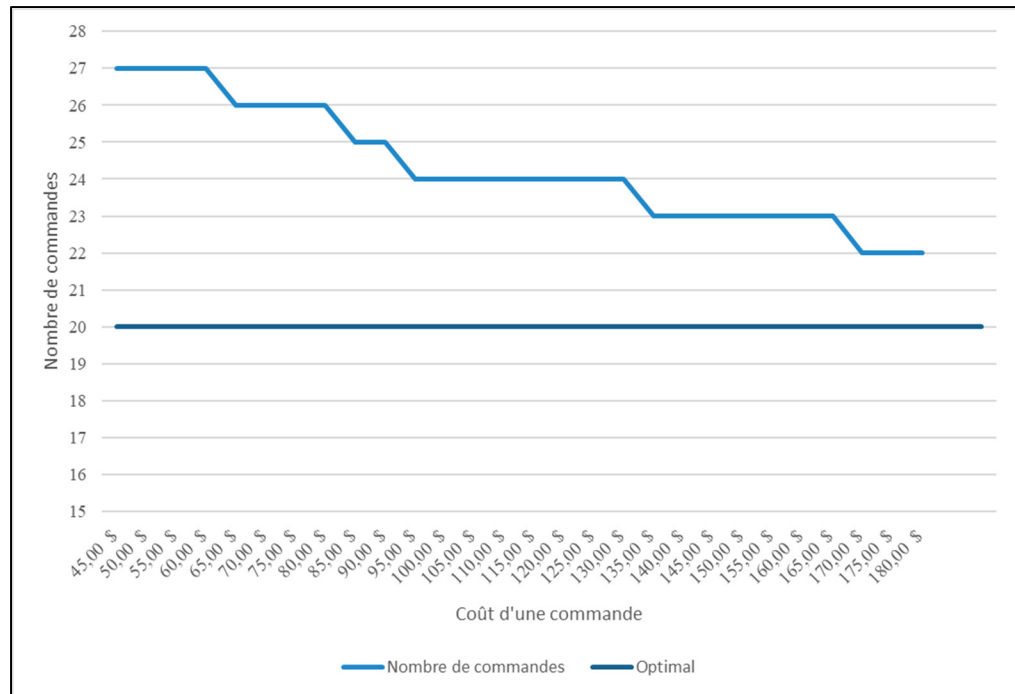


Figure 5.10 Impacts de l'augmentation de coût de commande sur le nombre de commandes



Figure 5.11 Impacts de l'augmentation de coût de commande sur le coût total

Dans la Figure 5.11, nous présentons le coût total obtenu à la suite de l'exécution du modèle ainsi que le coût total réel, c'est-à-dire le coût total après déduction de la valeur de pénalité fictive sur le nombre de commandes. Nous pouvons remarquer que le coût total augmente avec l'augmentation du coût de commande par produit.

Ensuite, la Figure 5.13 montre les détails de cette augmentation au niveau du coût total. Nous présentons seulement les coûts où il y a eu, soit une augmentation, soit une réduction. Le coût de production, de transport et le coût des activités demeurent inchangés.

D'après la Figure 5.12, nous pouvons remarquer qu'il existe un compromis entre ces 3 coûts. Le coût total de commandes et le coût des stocks augmentent avec l'augmentation du coût de commande par produit, et le coût de configuration diminue.

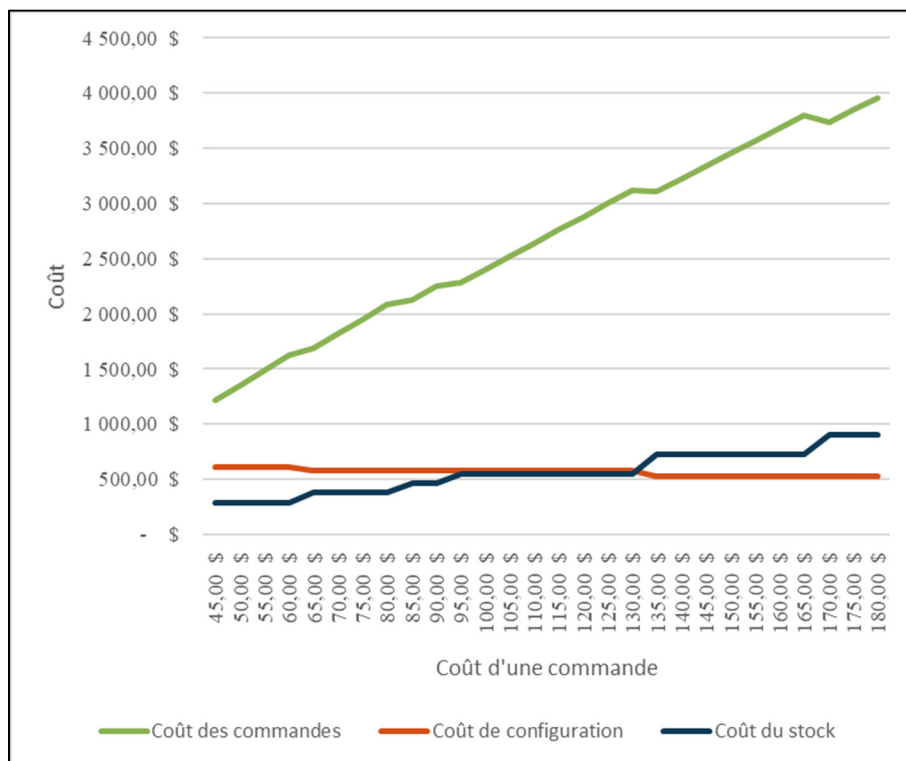


Figure 5.12 Impact de l'augmentation de coût de commande sur les différents coûts

Cette figure montre que le coût de possession de stock augmente avec l'augmentation du coût de commande. L'augmentation du coût de commande entraîne la commande d'un plus grand nombre de matériaux en même temps pour toutes les activités, donc une diminution de la fréquence de commande, ce qui se traduit par l'approvisionnement d'un plus grand nombre de matériaux à chaque fois de sorte que le matériau restant sur les sites ou à l'entrepôt augmente à la fin de la période et que la quantité est gardée en stock jusqu'au début de l'activité correspondante, ce qui explique l'augmentation au niveau du coût de stock.

Ensuite, l'impact de l'augmentation de commande a été également étudié pour différentes valeurs de H . L'annexe IV montre les résultats en matière de coûts et de nombre de commandes pour chaque valeur de H et pour chaque valeur de coût de commande. Parmi ces résultats, nous avons déterminé le minimum en matière de coût, qui correspond à la valeur de coût de commande $oc=170\$$ et $H=28$. Nous comparons dans la Figure 5.13 et la Figure 5.14 les résultats de ce cas avec le cas optimal où $oc=45\$$ et $H=24$. La variation entre les deux coûts est de 0,4% ; nous avons donc considérablement réduit la variation due à la décomposition, avec l'introduction de cette pénalité sur les commandes et avec l'augmentation de l'horizon de planification H .

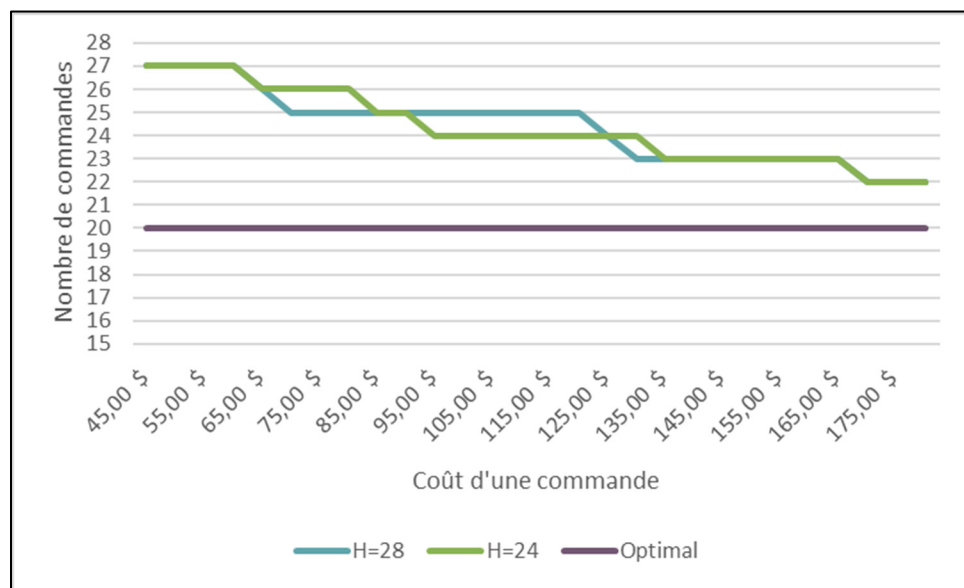


Figure 5.13 Comparaison de nombre de commandes

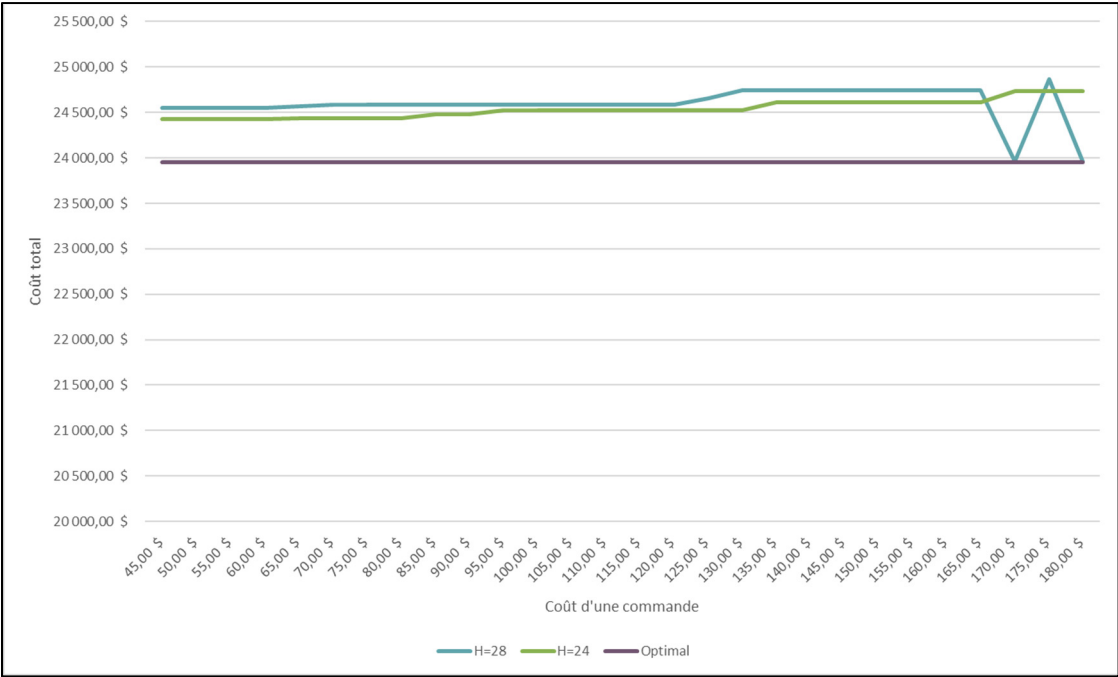


Figure 5.14 Comparaison de coût total

Le tableau 5.7 montre la différence en termes de coût dans les deux cas.

Tableau 5.6 Comparaison des éléments de coûts

Coût	H=24	H=28
Coût des activités	950 \$	930 \$
Coût des commandes	900 \$	990 \$
Coût de production	17 600 \$	17 600 \$
Coût de configuration	530 \$	560 \$
Coût de transport	585 \$	585 \$
Coût du stock	190 \$	100 \$
Pénalité	- \$	- \$
Récompense	- \$	- \$
Production stock initial	3 200 \$	3 200 \$
Total	23 955 \$	23 965 \$
Nombre de commandes	20	22

Pour pouvoir comparer correctement les coûts, la pénalité sur le nombre de commandes a été déduite des coûts de commandes et du coût total. Nous pouvons remarquer que la variation entre ces coûts est due principalement au coût de commandes, au coût de configuration et au coût de stock.

5.3.3 Conclusion

Pour conclure, la principale valeur du problème PSMO est de fournir une analyse de compromis avec un objectif de minimisation des coûts. Avec cette analyse de sensibilité, nous avons pu remarquer que les changements au niveau du calendrier impactent grandement le plan de commandes et ainsi, les coûts totaux. Ensuite, la planification des commandes avec un calendrier fixe ne permet pas de changer le calendrier des activités pour agréger des commandes pour ceux-ci et donc chercher à faire des économies.

Donc, le PSMO a des implications importantes pour les gestionnaires de projet, dans la mesure où les décisions relatives aux matériaux doivent faire partie intégrante du processus de planification des activités du projet si l'on veut que celui-ci soit achevé dans les délais et de manière économique.

Par conséquent, il faut proposer une méthodologie de résolution plus efficace pour pouvoir considérer tous ces compromis des coûts, comme les algorithmes utilisés dans la littérature pour l'étude du problème PSMO qui considèrent des composantes de recherche externe et interne, qui déterminent respectivement le meilleur calendrier, et découvrir le meilleur plan d'approvisionnement en matériaux.

CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons étudié le problème de la planification intégrée de l'ordonnancement des projets et de la commande de matériaux pour plusieurs projets de construction. Nous avons considéré une CSC multi-échelons composé d'un fabricant, d'un entrepôt et de plusieurs sites de construction, travaillant sur différents projets de construction avec l'exécution de différentes activités, dont chacune requiert une quantité bien déterminée de produits modulaires. Les différents membres de la CSC collaborent les uns avec les autres afin de réduire le coût global de la chaîne et afin d'éviter les retards dans la livraison des projets.

La principale contribution du travail présenté est le modèle mathématique proposé, car il est le premier à traiter le PSMO avec l'intégration d'un fabricant et de plusieurs projets de construction. À notre connaissance, il n'y a aucune étude qui inclut des problèmes simultanés d'ordonnancement de projet et de commande de matériaux pour plusieurs projets de construction. Le modèle mathématique formulé en MIP a été développé, visant à déterminer le calendrier du projet, le plan et la quantité de commandes des matériaux ainsi que la planification de la production, le transport et le contrôle des stocks, tout en minimisant les coûts globaux liés au fabricant, à l'entrepôt et aux sites de construction. La fonction objectif comprend le coût de fabrication, le coût de commande, le coût de transport, le coût de possession des stocks, le coût des activités et le coût de la pénalité ou de la récompense due à l'achèvement précoce ou tardif du projet. La durée des activités du projet a été traitée comme une variable de décision qui peut être soumise à une compression.

Le modèle a été mis en œuvre à l'aide de l'environnement de développement pour Python, Spyder, pour traiter l'objectif du modèle, et les relations mathématiques ont été saisies à l'aide du langage de modélisation mathématique Pyomo. Ensuite, l'applicabilité et l'efficacité du modèle proposé sont testées à travers une petite instance numérique et les avantages de l'intégration de la CSC dans l'amélioration de la performance des projets de construction ont été démontrés. L'étude comparative entre une CSC intégrée et une CSC non intégrée a prouvé qu'en absence de collaboration entre les acteurs du CSC le coût total de la chaîne

d'approvisionnement est plus élevé. Dans cette étude, pour des raisons de simplicité et de réalité, nous avons considéré l'hypothèse que les différents entrepreneurs acceptent de retarder leurs projets si cela réduit le coût global de la CSC. Dans la pratique, il faut trouver une façon de répartir les gains et de partager les bénéfices de cette réduction de coûts entre les différents acteurs de la chaîne. En outre, nous prenons comme hypothèse que le BIM va servir de base de données qui permet d'avoir accès aux informations liées aux différents acteurs de la CSC à l'avance afin de bien planifier les projets et les commandes de matériaux, mais dans la pratique il faut trouver une façon d'extraire ces données avec le BIM ou un autre outil de partage d'informations.

Le modèle a été résolu avec des solutions satisfaisantes dans un temps de calcul relativement court. Cependant, ce temps de calcul dépend fortement de la taille du problème et cela pourrait limiter la résolution du modèle par la méthode exacte aux grandes instances de problème, mais cela pourra être résolu en envisageant des techniques de résolution approximative. Ainsi, une procédure de décomposition a été suggérée pour servir de méthodologie de résolution aux problèmes de grande taille. Cette décomposition du problème de PSMO réduit considérablement la complexité de calcul du problème. Ensuite, certaines modifications du modèle ont été envisagées pour se rapprocher de la solution optimale. Finalement, l'analyse de sensibilité nous a permis d'avoir un aperçu de l'impact des changements de certains paramètres du modèle sur les coûts des projets de construction, qui donnent une idée aux décideurs sur les divers compromis entre les coûts du projet.

Le modèle développé a des implications pour les gestionnaires, tant dans les industries traditionnelles de projet comme l'industrie de construction, que dans les environnements de fabrication à la commande.

Certaines améliorations et extensions de cette recherche pour des études futures pourraient être intéressantes.

La méthode de résolution proposée pour résoudre les problèmes de grandes tailles n'a pas été testée dans le cadre de cette étude sur des instances plus grandes, c'est-à-dire sur des réseaux de projets avec plus d'activités. Étant donné que le problème est prouvé comme étant un problème NP-difficile, l'une des plus grandes priorités pour améliorer cette étude est de résoudre le modèle MILP en adoptant une heuristique ou une métaheuristique comme méthodologie de résolution au problème, comme dans la plupart des travaux de recherche ayant étudié le problème PSMO, en particulier pour les larges instances, afin de pouvoir planifier un grand nombre de projets avec un grand nombre d'activités et se rapprocher de la réalité de l'industrie de construction et avoir des résultats proches de la solution optimale. L'algorithme génétique de tri non dominé (NSGA-II) est l'une des métaheuristicues qui pourront être étudiées. La raison la plus importante derrière le choix de cet algorithme NSGA-II est qu'il a résolu avec succès les modèles pour les problèmes PSMO dans des études précédentes. Les résultats peuvent également être comparés aux autres métaheuristicues et le reste des méthodes de résolution utilisées en matière d'efficacité de la solution et en surtout en matière de temps de résolution pour les larges instances. Aussi, il sera intéressant d'explorer les méthodes de résolution utilisées dans le secteur manufacturier dans le cadre des projets qui procurent des produits sur commandes (*Make-to-order*).

De plus, il sera utile de considérer plusieurs fabricants, des politiques d'escompte sur la quantité de commandes des produits, la sélection des fournisseurs dans le problème intégré ; des hypothèses plus réalistes peuvent également être considérées comme une extension.

Il est possible aussi de considérer en plus des ressources non renouvelables, les ressources renouvelables comme autre direction de recherche, en considérant par exemple la disponibilité des équipements et de la main-d'œuvre requise pour l'exécution de l'activité.

Ensuite, dans cette étude, le modèle a été développé dans un environnement déterministe et la formulation mathématique n'a pas intégré d'incertitudes au niveau des paramètres, ce qui peut donner lieu à des solutions irréalistes et éloignées du monde réel. La prise en compte des critères de risque et de certaines incertitudes, tel que les incertitudes au niveau des durées des

activités ou du délai d'acquisition des matériaux, peuvent être considérées dans le problème tout en analysant l'impact sur la durée des projets et le coût total de la chaîne d'approvisionnement. Dans cette étude aussi, les pourcentages d'économie fournis sont basés sur un exemple numérique, mais une étude de cas réelle pourrait être réalisée pour obtenir des résultats plus réalistes.

Finalement, le modèle mathématique peut être développé encore davantage pour adopter un aspect multi-objectif pour le problème PSMO afin de minimiser les coûts totaux du projet, de maximiser la VAN, de maximiser la robustesse du calendrier, de minimiser les impacts environnementaux à la lumière du développement durable, et enfin de maximiser les avantages sociaux qui sont en lien avec l'exécution du projet.

ANNEXE I

COMPARAISON DES VARIABLES DE DÉCISION

Article	Variable de décision								
	Binaire			Entier					
	Période de début/ fin	Point de commande	Sélection des fournisseurs	Durée de l'activité	Quantité de commande	Niveau de stock	Disponibilité de la ressource renouvelable	Valeur de l'activité achevée à la fin de la période	Valeur du projet à la fin de la période
(Smith-Daniels et Smith-Daniels 1987b)	x	x			x	x		x	
(Smith-Daniels et Smith-Daniels 1987a)	x	x							
(Dodin et Elimam 2001)	x	x		x	x	x		x	x
(Hassanzadeh, Sheikh Sajadieh, et Shadrokh 2009)	x	x		x		x		x	x
(Najafi, Zoraghi, et Azimi 2011)	x	x			x	x			
(N. Zoraghi, Najafi, et Akhavan Niaki 2012)	x	x			x	x			
(Fu 2014)	x	x			x	x			
(Niaki et al. 2015)	x	x			x	x			
(Shahsavar, Abbasi, et Zoraghi 2015)	x	x			x	x	x		
(Babak H. Tabrizi et Ghaderi 2015b)	x	x		x	x	x		x	x
(Babak H. Tabrizi et Ghaderi 2015a)	x	x				x			
(B.H. Tabrizi et Ghaderi 2016)	x	x	x			x			
(Babak H. Tabrizi et Ghaderi 2016)	x	x	x			x	x		
(Nima Zoraghi et al. 2017)	x	x			x	x			
(N. Zoraghi, Shahsavar, et Niaki 2017)	x	x			x	x	x		
(Babak H. Tabrizi 2018)	x	x	x		x	x	x		
Babak H. Tabrizi et al. 2019	x	x	x			x			
(Habibi, Barzinpour, et Sadjadi 2019)	x	x	x			x			
(Akhbari 2020)	x	x			x	x			
(Zhang et al. 2020)	x (entier)	x (entier)							
(Zhang et Cui 2021)	x	x				x			
(Patoghi et Mousavi 2021)	x	x	x		x	x	x (binaire)		
Cette étude	Les deux	x		x	x	x			

Figure-A I-1 Comparaison des variables de décision

ANNEXE II

COMPARAISON DES CARACTÉRISTIQUES

Article	Caractéristiques												
	Multi-fournisseurs	Multi-sites de construction	Multi-modes	Multi-objectifs	Début/ fin précoce/tardif	Compression de la durée des activités	Limite supérieure/ inférieure	Escompte sur la quantité	Délai d'acquisition des matériaux	Ressources renouvelables	Ressources non-renouvelables	Incertitude	Capacité de stockage
(Smith-Daniels et Smith-Daniels 1987b)					x				x		x		
(Smith-Daniels et Smith-Daniels 1987a)					x				x		x		
(Dodin et Elimam 2001)					x	x	x	x	x		x		
(Hassanzadeh, Sheikh Sajadieh, et Shadrokh 2009)					x	x	x	x	x		x		
(Najafi, Zoraghi, et Azimi 2011)					x						x		
(N. Zoraghi, Najafi, et Akhavan Niaki 2012)					x						x		
(Fu 2014)			x							x	x		
(Niaki et al. 2015)					x					x	x		
(Shahsavari, Abbasi, et Zoraghi 2015)					x			x		x	x		
(Babak H. Tabrizi et Ghaderi 2015b)					x	x	x	x	x		x		x
(Babak H. Tabrizi et Ghaderi 2015a)				x	x			x	x		x		
(B.H. Tabrizi et Ghaderi 2016)	x				x			x	x		x		
(Babak H. Tabrizi et Ghaderi 2016)	x			x	x			x	x	x	x	x (durée des activités et coûts d'exécution)	
(Nima Zoraghi et al. 2017)			x		x					x	x		
(N. Zoraghi, Shahsavari, et Niaki 2017)			x	x				x		x	x		
(Babak H. Tabrizi 2018)	x			x	x			x	x	x	x		
Babak H. Tabrizi et al. 2019	x				x			x	x		x		
(Habibi, Barzinpour, et Sadjadi 2019)	x			x				x	x	x	x		
(Akhbari 2020)			x					x		x	x		
(Zhang et al. 2020)											x	x (durée des activités)	
(Zhang et Cui 2021)				x							x		
(Patoghi et Mousavi 2021)	x	x (1 projet)	x					x	x	x	x	x (durée des activités et délai d'acquisition des matériaux)	
Cette étude		x			x	x	x				x		x

Figure-A II-1 Comparaison des caractéristiques

ANNEXE III

DÉTAILS DU COÛT TOTAL

Article	Coût total												
	VAN	Coût des activités	Coût de commandes	Coût de stock	Coût de détention des activités achevées	Coût de compression	Coût de pénurie	Coût des ressources non-renouvelables	Coût des ressources renouvelables	Coûts indirects (gestion du chantier, équipements de sécurité, etc)	Coût d'instabilité (déviation par rapport à la durée normale)	Récompense	Pénalité
(Smith-Daniels et Smith-Daniels 1987b)			x	x	x								x
(Smith-Daniels et Smith-Daniels 1987a)	x	x	x	x								x	x
(Dodin et Elimam 2001)			x	x	x	x		x				x	x
(Hassanzadeh, Sheikh Sajadieh, et Shadrokh 2009)			x	x	x	x		x				x	x
(Najafi, Zoraghi, et Azimi 2011)			x	x									
(N. Zoraghi, Najafi, et Akhavan Niaki 2012)			x	x									
(Fu 2014)			x	x			x	x	x			x	x
(Niaki et al. 2015)			x	x									
(Shahsavari, Abbasi, et Zoraghi 2015)			x	x				x	x				
(Babak H. Tabrizi et Ghaderi 2015b)			x	x	x	x		x				x	x
(Babak H. Tabrizi et Ghaderi 2015a)			x	x				x				x	x
(B.H. Tabrizi et Ghaderi 2016)	x	x	x	x				x					
(Babak H. Tabrizi et Ghaderi 2016)			x	x				x	x			x	x
(Nima Zoraghi et al. 2017)			x	x								x	x
(N. Zoraghi, Shahsavari, et Niaki 2017)			x	x				x	x				
(Babak H. Tabrizi 2018)			x	x				x	x			x	x
Babak H. Tabrizi et al. 2019	x	x	x	x				x					
(Habibi, Barzinpour, et Sadjadi 2019)	x	x	x	x				x				x	x
(Akhbari 2020)			x	x				x	x			x	x
(Zhang et al. 2020)			x	x	x						x		
(Zhang et Cui 2021)			x	x						x			
(Patoghi et Mousavi 2021)			x	x				x	x			x	x
Cette étude			x	x		x						x	x

Figure-A III-1 Détails du coût total

ANNEXE IV

IMPACT DE CHANGEMENT D'AUGMENTATION DE L_{ij}

	Décompositio eij lij compression	Décomposition eij lij	Décomposition eij lij	Décomposition eij lij	Décomposition eij lij	Décomposition eij lij	Décomposition eij lij	Décomposition eij lij	Décomposition eij lij	Décomposition eij lij	Décomposition eij lij	Décomposition eij lij	Décomposition eij lij
H	24	24	24	24	24	24	24	23	25	23	22	25	26
lij (i=1,j=10)	24	24	24	24	24	24	23	23	23	23	22	25	26
lij (i=2,j=10)	24	23	22	21	20	19	21	21	21	23	22	25	26
Coût des activités	950,00 \$	930,00 \$	930,00 \$	930,00 \$	930,00 \$	955,00 \$	950,00 \$	950,00 \$	950,00 \$	950,00 \$	970,00 \$	930,00 \$	930,00 \$
Coût des commandes	1 170,00 \$	1 215,00 \$	1 215,00 \$	1 080,00 \$	1 125,00 \$	1 170,00 \$	1 080,00 \$	1 080,00 \$	1 080,00 \$	1 170,00 \$	1 215,00 \$	1 305,00 \$	1 215,00 \$
Coût de production	17 600,00 \$	17 600,00 \$	17 600,00 \$	17 600,00 \$	17 600,00 \$	17 600,00 \$	17 600,00 \$	17 600,00 \$	17 600,00 \$	17 600,00 \$	17 600,00 \$	17 600,00 \$	17 600,00 \$
Coût de configuration	560,00 \$	510,00 \$	530,00 \$	530,00 \$	530,00 \$	510,00 \$	530,00 \$	530,00 \$	530,00 \$	510,00 \$	590,00 \$	610,00 \$	530,00 \$
Coût de transport	585,00 \$	585,00 \$	585,00 \$	585,00 \$	585,00 \$	585,00 \$	585,00 \$	585,00 \$	585,00 \$	585,00 \$	585,00 \$	585,00 \$	585,00 \$
Coût du stock	330,00 \$	385,00 \$	320,00 \$	265,00 \$	345,00 \$	300,00 \$	265,00 \$	265,00 \$	265,00 \$	345,00 \$	355,00 \$	340,00 \$	385,00 \$
Pénalité	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$
Récompense	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$	- \$
Production stock initial	3 200,00 \$	3 200,00 \$	3 200,00 \$	3 200,00 \$	3 200,00 \$	3 200,00 \$	3 200,00 \$	3 200,00 \$	3 200,00 \$	3 200,00 \$	3 200,00 \$	3 200,00 \$	3 200,00 \$
Total	24 395,00 \$	24 425,00 \$	24 380,00 \$	24 190,00 \$	24 315,00 \$	24 320,00 \$	24 210,00 \$	24 210,00 \$	24 210,00 \$	24 360,00 \$	24 515,00 \$	24 570,00 \$	24 445,00 \$
Nombre de commandes	26	27	27	24	25	26	24	24	24	26	27	29	27

Figure-A IV-1 Premiers résultats

BIBLIOGRAPHIE

- Akhbari, M. (2020). Integration of Multi-mode Resource-Constrained Project Scheduling under bonus-penalty policies with Material Ordering under Quantity Discount scheme for minimizing project cost. *Scientia Iranica*, 0. <https://doi.org/10.24200/sci.2020.54286.3680>
- Antillón, E., Morris, M., & Gregor, W. (2014). A Value-Based Cost-Benefit Analysis of Prefabrication Processes in the Healthcare Sector: A Case Study.
- Aquilano, N. J., & Smith, D. E. (1980). A formal set of algorithms for project scheduling with critical path scheduling/material requirements planning. *Journal of Operations Management*, 1(2), 57-67. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(80\)90013-3](https://doi.org/10.1016/0272-6963(80)90013-3)
- Commission de la construction du Québec. (2022). L'industrie de la construction. Repéré à <https://www.ccq.org/fr-CA/En-tete/qui-sommes-nous/industrie-de-la-construction>
- Dodin, B., & Elimam, A. A. (2001). Integrated Project Scheduling and Material Planning with Variable Activity Duration and Rewards. *IIE Transactions*, 33(11), 1005-1018. <https://doi.org/10.1023/A:1010994519405>
- Dodin, B., & Elimam, A. A. (2008). Integration of equipment planning and project scheduling. *European Journal of Operational Research*, 184(3), 962-980. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.09.104>
- Fu, F. (2014). Integrated scheduling and batch ordering for construction project. *Applied Mathematical Modelling*, 38(2), 784-797. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.07.017>
- Golpîra, H. (2020). Optimal integration of the facility location problem into the multi-project multi-supplier multi-resource Construction Supply Chain network design under the vendor managed inventory strategy. *Expert Systems with Applications*, 139, 112841. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.112841>
- Habibi, F., Barzinpour, F., & Sadjadi, S. J. (2019). A mathematical model for project scheduling and material ordering problem with sustainability considerations: A case study in Iran. *Computers & Industrial Engineering*, 128, 690-710. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.007>
- Hamdan, S., Barkokebas, B., Manrique, J., & Al-Hussein, M. (2015). *A BIM-Based Simulation Model for Inventory Management in Panelized Construction*. (S.l.): (s.n.). <https://doi.org/10.22260/ISARC2015/0092>
- Hassanzadeh, F., Sheikh Sajadieh, M., & Shadrokh, S. (2009). Concurrent Project Scheduling and Material Planning: A Genetic Algorithm Approach. *Scientia Iranica*, 16(2). Repéré à http://scientiairanica.sharif.edu/article_3289.html
- How disruption is reshaping construction | McKinsey. (2020). Repéré à <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/the-next-normal-in-construction-how-disruption-is-reshaping-the-worlds-largest-ecosystem>
- Hsu, P.-Y., Angeloudis, P., & Aurisicchio, M. (2018). Optimal logistics planning for modular construction using two-stage stochastic programming. *Automation in Construction*, 94, 47-61. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.029>
- Hussein, M., Eltoukhy, A. E. E., Karam, A., Shaban, I. A., & Zayed, T. (2021). Modelling in off-site construction supply chain management: A review and future directions for

- sustainable modular integrated construction. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127503. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127503>
- Janné, M., Fredriksson, A., Berden, M., Ploos van Amstel, W., Hulthén, K., Morel, M., ... de Radigues, P. (2018). *SMART CONSTRUCTION LOGISTICS*. (S.l.) : (s.n.).
- Le, P. L., Elmughrabi, W., Dao, T.-M., & Chaabane, A. (2020). Present focuses and future directions of decision-making in construction supply chain management: a systematic review. *International Journal of Construction Management*, 20(5), 490-509. <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1488089>
- Lee, D., & Lee, S. (2021). Digital Twin for Supply Chain Coordination in Modular Construction. *Applied Sciences*, 11(13), 5909. <https://doi.org/10.3390/app11135909>
- Ministère de l'Économie et de l'Innovation. (2021). Construction / Présentation de l'industrie de la construction - MEI. *Ministère de l'Économie et de l'Innovation*. Repéré à https://www.economie.gouv.qc.ca/objectifs/informer/par-secteur-dactivite/construction/page/le-secteur-12822/?tx_igaffichagepages_pi1%5Bmode%5D=single&tx_igaffichagepages_pi1%5BbackPid%5D=151&tx_igaffichagepages_pi1%5BcurrentCat%5D=&cHash=2f652a927e3f9a6ca36b46dcef723302
- Najafi, A. A., Zoraghi, N., & Azimi, F. (2011). Scheduling a project to minimize costs of material requirements. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 78, 134-137.
- Niaki, S. T. A., Najafi, A. A., Zoraghi, N., & Abbasi, B. (2015). Resource Constrained Project Scheduling with Material Ordering: Two Hybridized Meta-Heuristic Approaches (TECHNICAL NOTE). *International Journal of Engineering*, 28(6), 896-902.
- Ocheoha, I. A., & Moselhi, O. (2018). A BIM-based Supply Chain Integration for Prefabrication and Modularization. *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings*. <https://doi.org/10.29173/mocs35>
- Papadopoulos, G. A., Zamer, N., Gayialis, S. P., & Tatsiopoulos, I. P. (2016). Supply Chain Improvement in Construction Industry. *Universal Journal of Management*, 4(10), 528-534. <https://doi.org/10.13189/ujm.2016.041002>
- Patoghi, A., & Mousavi, S. M. (2021). A new approach for material ordering and multi-mode resource constraint project scheduling problem in a multi-site context under interval-valued fuzzy uncertainty. *Technological Forecasting and Social Change*, 173, 121137. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121137>
- Reinventing construction through a productivity revolution | McKinsey. (2017). Repéré à <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution>
- Shahsavar, A., Abbasi, B., & Zoraghi, N. (2015). Material ordering with discount policy integrated with a project scheduling problem. Dans *2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (pp. 1223-1226). <https://doi.org/10.1109/IEEM.2015.7385842>
- Smith-Daniels, D. E., & Aquilano, N. J. (1984). Constrained resource project scheduling subject to material constraints. *Journal of Operations Management*, 4(4), 369-387. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(84\)90022-6](https://doi.org/10.1016/0272-6963(84)90022-6)

- Smith-Daniels, D. E., & Aquilano, N. J. (1987). Using a Late-Start Resource-Constrained Project Schedule to Improve Project Net Present Value*. *Decision Sciences*, 18(4), 617-630. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1987.tb01550.x>
- Smith-Daniels, D. E., & Smith-Daniels, V. L. (1987a). Maximizing the net present value of a project subject to materials and capital constraints. *Journal of Operations Management*, 7(1-2), 33-45. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(87\)90005-2](https://doi.org/10.1016/0272-6963(87)90005-2)
- Smith-Daniels, D. E., & Smith-Daniels, V. L. (1987b). Optimal Project Scheduling with Materials Ordering. *IIE Transactions*. <https://doi.org/10.1080/07408178708975378>
- Studer, W. P., & De Brito Mello, L. C. B. (2021). Core Elements Underlying Supply Chain Management in the Construction Industry: A Systematic Literature Review. *Buildings*, 11(12), 569. <https://doi.org/10.3390/buildings11120569>
- Tabrizi, Babak H. (2018). Integrated planning of project scheduling and material procurement considering the environmental impacts. *Computers & Industrial Engineering*, 120, 103-115. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.04.031>
- Tabrizi, Babak H., & Ghaderi, S. F. (2015a). A Bi-Objective Model to Address Simultaneous Formulation of Project Scheduling and Material Ordering. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, 9(11), 1969-1972.
- Tabrizi, Babak H., & Ghaderi, S. F. (2015b). An Integrated Mixed-Integer Programming Model to Address Concurrent Project Scheduling and Material Ordering. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, 9(11), 1960-1963.
- Tabrizi, Babak H., & Ghaderi, S. F. (2016). A robust bi-objective model for concurrent planning of project scheduling and material procurement. *Computers & Industrial Engineering*, 98, 11-29. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.05.017>
- Tabrizi, Babak H., Ghaderi, S. F., & Haji-Yakhchali, S. (2019). Net present value maximisation of integrated project scheduling and material procurement planning. *International Journal of Operational Research*, 34(2), 285-300. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2019.097581>
- Tabrizi, B.H., & Ghaderi, S. F. (2016). Simultaneous planning of the project scheduling and material procurement problem under the presence of multiple suppliers. *Engineering Optimization*, 48(9), 1474-1490. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2015.1114772>
- Tserng, H. P., Yin, S. Y. L., & Li, S. (2006). Developing a Resource Supply Chain Planning System for Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(4), 393-407. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2006\)132:4\(393\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2006)132:4(393))
- Wagner, H. M., & Whitin, T. M. (1958). Dynamic Version of the Economic Lot Size Model. *Management Science*, 5(1), 89-96. <https://doi.org/10.1287/mnsc.5.1.89>
- Zhang, Y., & Cui, N. (2021). Project scheduling and material ordering problem with storage space constraints. *Automation in Construction*, 129, 103796. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103796>
- Zhang, Y., Cui, N., Hu, X., & Hu, Z. (2020). Robust project scheduling integrated with materials ordering under activity duration uncertainty. *Journal of the Operational Research Society*, 71(10), 1581-1592. <https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1610340>

- Zoraghi, N., Najafi, A. A., & Akhavan Niaki, S. T. A. (2012). An integrated model of project scheduling and material ordering: A hybrid simulated annealing and genetic algorithm. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 5(10), 19-27.
- Zoraghi, N., Shamsavar, A., & Niaki, S. T. A. (2017). A hybrid project scheduling and material ordering problem: Modeling and solution algorithms. *Applied Soft Computing*, 58, 700-713. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.05.030>
- Zoraghi, Nima, Shamsavar, A., Abbasi, B., & Van Peteghem, V. (2017). Multi-mode resource-constrained project scheduling problem with material ordering under bonus–penalty policies. *TOP*, 25(1), 49-79. <https://doi.org/10.1007/s11750-016-0415-2>