

Conception de chaînes logistiques pour des projets de construction modulaire

par

Thomas CAZIN

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.

MONTRÉAL, LE 22 FÉVRIER 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Thomas Cazin, 2021



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 du génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Marc Paquet, codirecteur de mémoire
Département du génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M James Lapalme, président du jury
Département du génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

Mme Ivanka Iordanova, membre du jury
Département du génie de la construction à l'École de technologie supérieure

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

LE 15 FÉVRIER 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les professeurs Amin Chaabane et Marc Paquet, mes directeur et co-directeur de mémoire, pour leurs conseils et leur guidage précieux tout au long de ce projet de recherche.

Merci également à Akire Cortes pour son aide précieuse à l'appropriation du logiciel FICO® de Xpress Optimization, et pour notre travail en commun à une période clef de ce projet.

Je remercie mes parents pour m'avoir soutenu tout au long de ces deux ans, et plus généralement depuis toujours ; ils ont toujours fait en sorte que je puisse réaliser mes objectifs dans les meilleures conditions.

Je remercie Quentin Lecuru, qui m'a accueilli, hébergé et épaulé à mon arrivée au Québec.

Je remercie ma grand-mère, Régine Cazin, qui m'aura encouragé tout au long de mes études, dans le travail mais aussi dans la vie privée, et qui n'aura pas pu voir l'aboutissement de ce projet. Je remercie ma grand-mère Antoinette Debremme, et Jean Pierre Debremme, pour leurs soutiens et leurs encouragements permanents dans tous mes objectifs.

Enfin je remercie toutes les personnes qui m'ont accompagné au cours de ces deux années au Québec par leurs amitiés et leur bienveillance.

Conception de chaînes logistiques pour des projets de construction modulaire

Thomas CAZIN

RÉSUMÉ

La conception de la chaîne logistique (supply chain) dans un projet de construction est à l'heure actuelle très manuelle. La conséquence de ce fait est une organisation peu efficace, entraînant des surcoûts et des dépassements de délais conséquents, réduisant ainsi la rentabilité des projets. En outre, un manque de concertation entre les différents acteurs de la chaîne logistique cause des difficultés supplémentaires pouvant ralentir le projet et gêner les activités.

L'étude des méthodes de conception et d'optimisation de la chaîne logistique dans le secteur manufacturier souligne un retard important de l'industrie de la construction, et met en évidence l'intérêt possible à adapter les méthodes déjà existantes dans l'industrie manufacturière au cas de la construction. Après avoir observé les modèles de conception et d'optimisation développés dans la littérature, nous en avons donc construit un nouveau, adapté aux problématiques spécifiques du secteur étudié et permettant d'influencer la prise de décision dès la conception du projet.

Une première version permet l'optimisation des coûts d'une construction simple comportant plusieurs possibilités pour être réalisée. Une planification est ensuite effectuée à partir des données issues de la simulation. Une seconde version du modèle intègre la problématique du stockage et ajoute également la possibilité d'influer sur le temps de réalisation grâce à l'introduction d'un « *crashing cost* ». Les différentes options ainsi générées à travers ces versions permettent de servir d'aide à la décision au moment de concevoir la chaîne logistique, et donc augmenter l'intégration au sein de celle-ci pour réduire les incidents.

Mots-clés : gestion de la chaîne logistique de la construction, logistique de construction, modèle d'optimisation, programmation en nombres mixtes, matrice de transition.

Supply chain design for modular construction projects

Thomas CAZIN

ABSTRACT

The design of the supply chain in a construction project is currently very manual. The consequence of this fact is an inefficient organization, resulting in additional costs and overruns of significant deadlines, thus allowing the profitability of the projects. In addition, a lack of cooperation between the various actors in the supply chain causes additional difficulties that can slow down the project and generate activities.

The study of the methods of design and optimization of the supply chain in the manufacturing sector underlines a significant delay in the construction industry and underline the possibility to adapt the methods already existing in the manufacturing industry in the case of construction. After seeing the design and optimization models developed in the literature, we therefore built a new one, adapted to the specific problems of the sector studied.

A first version allows the optimization of the costs of a simple construction with several possibilities to be carried out. Planning is then carried out using the simulation data. A second version of the model integrates the storage issue and adds the possibility of influencing the grace period thanks to the introduction of a crash cost. The different options thus generated through these versions make it possible to serve as decision support when designing the supply chain, and therefore to increase integration within it to reduce incidents.

Keywords : construction supply chain management, construction logistics, optimization models, mixed-number programming, transition matrix.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE	3
1.1 Contexte	3
1.2 Problématique de recherche.....	6
1.3 Méthodologie	7
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	11
2.1 Les évolutions en cours dans la chaîne logistique de la construction.....	11
2.2 Les outils à développer pour la gestion de la chaîne logistique.....	15
2.3 La philosophie lean dans la chaîne logistique.....	17
2.4 Modèles développés pour la conception de chaînes logistiques.....	20
2.4.1 Modèle développé par Chiu & Okudan (2011).....	21
2.4.2 Modèle de Khalaf et al. (2011)	24
2.4.3 Modèle de Nepal et al. (2012).....	26
2.4.4 Modèle développé par Benkaddour (2007).....	30
2.4.5 Modèle de Paquet et al. (2006)	32
2.4.6 Modèle de Martel (2005)	34
2.5 Discussion et pistes d'adaptation au secteur de la construction	34
2.5.1 Adaptation générale du cadre au contexte de la construction.....	36
2.5.2 Pistes d'adaptation du modèle de Chiu et Okudan (2011) à la construction.....	37
CHAPITRE 3 PREMIÈRE VERSION DE MODÈLE : ADAPTATION SIMPLE AU SECTEUR DE LA CONSTRUCTION.....	41
3.1 Choix d'un exemple simplifié d'architecture pour développer le programme	41
3.2 Rédaction du programme adapté à la construction.	45
3.2.1 Notations et hypothèses	45
3.2.2 Définition des contraintes pour le modèle adapté.....	47
3.2.3 Inclusion du calcul du temps de réalisation et coûts des transports.....	49
3.2.4 Élaboration d'une planification simple.....	50
3.2.5 Insertion de contraintes de préséance dans la réalisation des processus.....	53
3.3 Discussion des résultats du modèle.....	55
3.3.1 Interprétation des résultats et validation du modèle	55
3.3.2 Limitations intrinsèques au modèle	58
3.3.3 Pistes de développement pour la seconde version	59
CHAPITRE 4 SECONDE VERSION DE MODÈLE : MODÈLE COMPLET	61

4.1	Modification de la philosophie du modèle.....	61
4.2	Formulation mathématique de la seconde version.....	63
4.2.1	Nouvelles notations.....	63
4.2.2	Hypothèses de travail.....	65
4.2.3	Formulation mathématique	66
4.2.4	Validation du modèle.....	72
CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET DISCUSSION.....		75
5.1	Interprétation des résultats du second modèle	75
5.2	Scénarios d’essais du modèle.....	79
5.2.1	Analyse 1 : Influence des limites de stockage sur la chaîne logistique.....	79
5.2.2	Analyse 2 : Incitation à la réduction des délais du projet	87
5.3	Discussion des résultats du modèle.....	91
CONCLUSION.....		95
ANNEXE I CONTRAINTES DU PROBLEME DE CHIU & OKUDAN (2011).....		97
ANNEXE II ALGORITHME DE LA PROCEDURE ARBORESCENCE		99
ANNEXE III DONNEES UTILISEES POUR LE SECOND MODÈLE		101
BIBLIOGRAPHIE.....		105

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1 Facteurs clefs et sous-facteurs de compatibilité dans la chaîne logistique	27
Tableau 2.2 Comparaison des caractéristiques des modèles présentés.....	35
Tableau 3.1 Nomenclature de l'architecture choisie pour les tests de programme	43
Tableau 3.2 Matrice de transition de l'exemple d'architecture utilisé pour le modèle.....	44
Tableau 3.3 Matrice de priorité des processus.....	54
Tableau 3.4 Processus et fournisseurs sélectionnés pour la réalisation du bâtiment.....	55
Tableau 4.1 Nomenclature du bâtiment modèle avec quantités	62
Tableau 4.2 Matrice de transition adaptée aux quantités	63
Tableau 5.1 Les processus sélectionnés pour la réalisation du modèle	76
Tableau 5.2 Espace disponible chez les fournisseurs (en mètre cube)	80
Tableau 5.3 Fournisseur choisi pour le scénario 1-A	81
Tableau 5.4 Choix des fournisseurs et processus pour le scénario 1-B.....	82
Tableau 5.5 Nouvelles valeurs de limitation des volumes de stocks.....	85
Tableau 5.6 Nouvelles valeurs des tailles de lots	85
Tableau 5.7 Résultats pour un surcoût de 1 000 \$ / activité en retard	90
Tableau 5.8 Choix des fournisseurs pour un surcoût de 1 000 \$	90

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Phases d'un projet de construction et problématiques correspondantes Adapté de Le et al. (2018).....	3
Figure 1.2 Méthodologie du mémoire	9
Figure 2.1 Méthodologie du modèle d'optimisation Adapté de Chiu et Okudan (2011, p.4).....	22
Figure 2.2 Méthodologie du modèle Adapté de Paquet et al. (2006)	33
Figure 2.3 Répartition des activités d'un projet de construction Adapté de Phuoc Luong Le, Walid Elmughrabi, Thien-My Dao & Amin Chaabane (2018, p.3)	36
Figure 3.1 Schéma de modèle pour l'armature de béton armé choisie Tiré de Ching & Adams (2003)	42
Figure 3.2 Architecture choisie après optimisation, avec chemin critique (rouge)	56
Figure 3.3 Planification des tâches et transports.....	57
Figure 5.1 Représentation graphique de la répartition des activités sur l'horizon de planification	76
Figure 5.2 Évolution des stocks de produit 9 chez les différents fournisseurs	78
Figure 5.3 Évolution du nombre d'unités des différents éléments s en inventaires	78
Figure 5.4 Évolution des stocks pour le scénario 1-A (en unités)	80
Figure 5.5 Taux d'occupation des espaces chez les fournisseurs pour le scénario 1-A (%).....	81
Figure 5.6 Évolution des stocks pour le scénario 1-B (en unités)	82
Figure 5.7 Taux d'occupation des espaces disponibles, scénario 1-B (%)	83
Figure 5.8 Évolution des stocks pour le scénario 1-C (en unités)	83
Figure 5.9 Taux d'occupation des places disponibles, scénario 1-C (%).....	84
Figure 5.10 Évolution des stocks (en unités) pour le scénario 1-D	85
Figure 5.11 Taux d'occupation de l'espace de stockage (%), scénario 1-D	86

Figure 5.12 Représentation graphique des temps de réalisation pour les différents cas.....	88
Figure 5.13 Évolution des coûts de projet en fonction des différents scénarii	88
Figure 5.14 Coûts supplémentaires liés au retard dans chaque configuration.....	89

INTRODUCTION

L'industrie de la construction est un secteur spécifique de l'industrie, comportant de nombreuses contraintes, tant par la législation mise en place dans différents pays que par le contexte spécifique qui l'accompagne. Souvent en ville, ou proche de lieux d'habitation, les projets de construction peuvent rapidement se trouver entravés par l'interaction avec leur voisinage. En outre, chaque projet de construction est unique, en dépit de la présence d'éléments standardisés dans chacun d'eux. Le lieu, les attentes du futur bâtiment, les points d'accès au site sont autant de données qui changent d'un projet à l'autre, remettant toute l'organisation en question à chaque fois, et causant ainsi des frictions dans la mise en œuvre du projet. Parallèlement à cela les projets de construction sont le lieu de rencontre d'une multitude d'acteurs, allant de la maîtrise d'ouvrage à l'ensemble des sous-traitants, en passant par l'entrepreneur principal du projet. Une telle diversité implique une coordination efficace pour la mise en œuvre de la construction, coordination qui s'avère insuffisante au travers de la littérature, et cause à terme des retards dans les projets et des dépassements de budget.

Face à ces défis, l'industrie de la construction est en pleine mutation. Elle développe de nouveaux outils pour répondre aux problématiques auxquelles elle fait face, et tente d'améliorer son organisation. Par là il s'agit de répondre aux demandes des maîtres d'ouvrage en respectant les délais et les coûts fixés lors de la signature du contrat, avec à la clef pour l'entrepreneur et ses sous-traitants des gains économiques. Pourtant de nombreux obstacles subsistent avant d'obtenir une gestion optimale des projets de construction. L'enjeu de la chaîne logistique représente à lui seul un défi considérable qui revêt pourtant une importance certaine dans l'efficacité de la réalisation d'une construction. Le manque d'implication des différents acteurs dès les premières étapes du projet est cause de dysfonctionnement dans la mise en œuvre de la logistique. Les casses et endommagements de matériaux, les stocks excessifs ou les livraisons tardives sont autant de gênes, parmi d'autres, qui entravent le bon déroulement du projet. La recherche de nos jours tend à rectifier cette organisation défailante par la coordination des parties prenantes d'une chaîne logistique dans un projet de construction. Cependant, le chemin est encore long, et une vision globale de la chaîne logistique est un

manque encore criant dans ce secteur. L'objectif est de parvenir in fine à une gestion de projets de construction similaire à la gestion de production dans le secteur manufacturier, grâce à une intégration accrue des acteurs et des problématiques des différentes phases d'un projet dès sa conception, et également une coordination entre les différents projets simultanés. L'utilisation de préfabriqués est une clef de cette approche en développement, car ils permettent l'innovation, l'économie de coûts de production, la réduction des temps de construction et surtout une standardisation des éléments et processus simplifiant l'approche d'un projet.

Ce mémoire a pour objectif de contribuer à l'amélioration de l'ingénierie de la chaîne logistique de l'industrie de la construction en proposant un modèle qui permettra son optimisation dès la phase de conception. Il vise à donner une vue d'ensemble sur la chaîne logistique dès la conception d'un projet, en permettant de réaliser un choix sur les solutions techniques potentielles en y associant une décision sur les fournisseurs, les coûts, les délais. Nous présenterons dans la revue de littérature les différentes problématiques relatives à la gestion de chaîne logistique dans la construction, ainsi que les perspectives d'amélioration présentées par la littérature. Nous tâcherons ensuite de développer un modèle de conception et d'optimisation de la chaîne logistique, en nous basant sur les éléments utilisés dans l'industrie manufacturière pour les adapter, afin de répondre à ces problématiques.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

1.1 Contexte

L'industrie de la construction se distingue des autres par l'unicité de chaque réalisation. Chacune d'elles est en effet un projet unique dépendant, outre de l'architecture, du lieu de construction, des politiques locales en matière de normes et réglementations, de l'accessibilité du site, ainsi que d'une multitude d'autres facteurs. L'organisation des chaînes d'approvisionnement, du déroulement des opérations et de la logistique de manière générale est donc fortement dépendante de chaque projet particulier, donc limitée dans le temps, et doit être repensée dès que l'on en change (CIVIC, 2018).

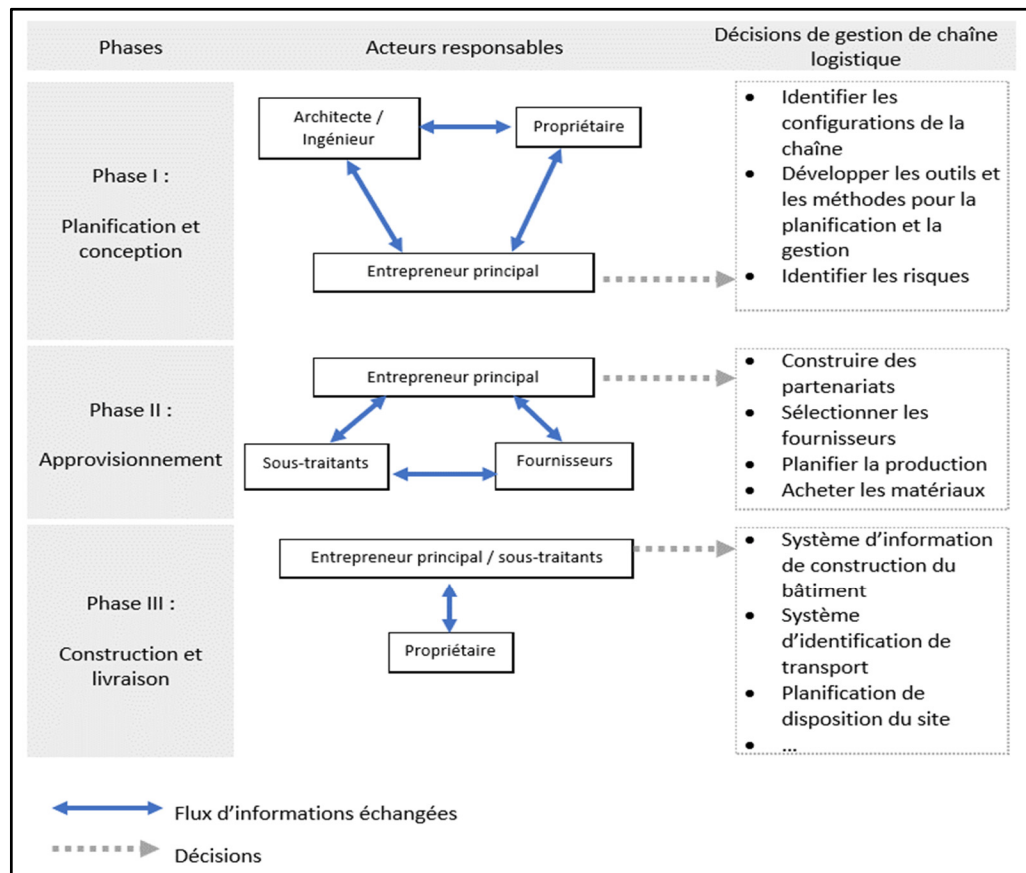


Figure 1.1 Phases d'un projet de construction et problématiques correspondantes
Adapté de Le et al. (2018)

Sur un projet de construction, l'utilisation importante et non uniforme de matériaux sur la durée du projet, les activités séquencées de cette industrie sur un projet, ainsi que le morcellement de l'industrie en une multitude d'acteurs impliquent l'utilisation massive des véhicules. Jusqu'à 20 % des poids lourds en ville et jusqu'à 40% des véhicules légers d'entreprise sont liés à cette industrie selon le projet CIVIC (2018). Les enjeux en termes de durabilité sont donc importants, du point de vue environnemental, ou du point de vue de la société pour qui la construction peut engendrer des nuisances importantes (bruits, endommagement des infrastructures, etc.). En outre, les parties prenantes à un projet de construction incluent aussi bien les entrepreneurs directement concernés que les municipalités, les commerces alentour et les institutions locales. Le, Elmughrabi, Dao et Chaabane., (2018) et Chaabane, As'ad et Bahroun. (2018) décrivent les activités du secteur de la construction selon un découpage en trois phases, au cours desquelles les interviennent les différentes parties prenantes. Ces trois phases sont la conception et la planification du projet, l'approvisionnement, et la réalisation et livraison de l'ouvrage, comme le montre la Figure 1.1. Elles font intervenir différentes problématiques qu'il s'agit de résoudre en incluant les parties prenantes dès les premiers stades du projet afin d'éviter les frictions, et pour coordonner les actions.

L'objectif de l'industrie de la construction est de passer de cette industrie complexe – morcelée entre de nombreux acteurs et différentes phases cloisonnées, basées sur une logique de projet – à une industrie plus standardisée qui permettra une intégration et une structuration renforcée, à la manière de l'industrie manufacturière comme l'indiquent João Ribeirinho et al. (2020). Il s'agirait alors d'avoir la possibilité de gérer plusieurs projets de construction simultanés de façon coordonnée, tout en ayant une coopération constante au long des différentes étapes de réalisation. Les auteurs constatent en outre que l'actuel morcellement de la construction implique un retard de productivité : moins de 1% de progression de la productivité sur les 20 dernières années, contre 2,8% pour l'économie en général. Dans l'optique de combler ce retard, l'utilisation de préfabriqués dans l'industrie de la construction s'accroît pour réaliser tout ou partie d'un projet. Leur développement permet en effet d'améliorer les performances de production et de développer l'innovation (Arashpour et al., 2017). L'utilisation systématique de préfabriqués permettrait de réduire considérablement les délais de construction, de 20 à 50

% (Bertram et al., 2019). La même étude envisage un potentiel de diminution des coûts de plus de 20 % à terme, dans le cadre d'une utilisation optimale des préfabriqués. La pertinence de cette solution est appuyée par la demande de logements dans de nombreux pays, comme les États-Unis, l'Allemagne, le Royaume uni ou l'Australie, ainsi que par un manque de main-d'œuvre dans ces mêmes pays. Le préfabriqué, comblant son déficit d'image, permet en outre de couvrir un large panel de solutions pour répondre aux besoins : de l'élément le plus simple et unitaire jusqu'à des structures complexes et complètes.

Concernant la chaîne logistique, Comelli (2008) la définit dans l'industrie en général d'une part comme un réseau d'entités physiques (partenaires, fournisseurs, clients, etc.), et d'autre part comme un ensemble ouvert qui est traversé par un ensemble de flux. Ces flux sont de trois natures : les flux physiques dont l'optimisation doit permettre la satisfaction du client (par la réduction des coûts), les flux financiers qui sont la contrepartie des flux physiques, et les flux informationnels qui permettent la coordination des deux précédents flux et de la chaîne entière. La chaîne logistique est aussi décrite comme un ensemble d'activités groupées au sein d'un processus logistique intégré. Elle est figurée par une structure basée sur des arcs qui symbolisent les flux. Ces arcs s'étendent entre des nœuds qui représentent les acteurs de la chaîne. Martel (2005) distingue trois types d'arcs et trois types de nœuds. Respectivement on trouve les arcs d'approvisionnement, les arcs internes (au sein des acteurs de la chaîne) et les arcs de la demande (du client vers l'entrepreneur principal du projet) ; ainsi que nœuds correspondant aux vendeurs externes ou les fournisseurs, les sites de production ou distribution, et les zones de demande.

À l'heure actuelle dans l'industrie de la construction, la chaîne logistique se distingue par son aspect fortement centralisé et par une gestion concentrée sur les ressources et matériaux en priorité plutôt que sur les organisations et leur efficacité (Le et al., 2018). Le et al. (2018) montrent que la chaîne logistique de l'industrie de construction est encore peu mature par rapport au secteur manufacturier. Elle accuse en effet selon eux un retard sur l'industrie manufacturière dans le développement d'outils et de méthodes de gestion de chaîne logistique. Ce retard la rend peu efficace et cause un manque de clarté dans la répartition des

responsabilités. À cela s'ajoute une logistique sur les sites qui est inefficace, par manque de contrôle et de planification, ou encore une coordination insuffisante avec la société environnant le projet. La conséquence directe de ces lacunes, conjuguées à une communication insuffisante entre les acteurs de la chaîne logistique, est l'apparition fréquente de retards et de dépassements de budget dans les projets de construction. Ainsi les gros projets de construction ont des dépassements de délais s'élevant en moyenne à 20 % des délais prévus (João Ribeirinho et al., 2020). Par ailleurs, l'actuelle orientation que prend l'industrie de la construction vers l'utilisation d'élément modulaire incite également repenser la façon dont sont anticipé les déroulements de projets de construction selon Hsu, Aurisicchio & Angeloudis (2017). Il est nécessaire en effet de comprendre le changement radical que fait intervenir l'utilisation de modules qui appelle à développer une solution nouvelle, qui n'est ni celle de la construction traditionnelle ni celle du manufacturier exactement.

L'objectif de la gestion de chaîne logistique est donc de développer la performance de la chaîne logistique. Le et al. (2018), Chaabane et al. (2018) et Berden (2017) constatent le besoin d'une intégration plus importante des différents acteurs de la chaîne pour en améliorer l'efficacité. L'intégration consiste à associer les parties prenantes au processus décisionnel afin de prendre en compte au plus tôt les différentes contraintes et attentes en jeu. Les études actuelles constatent justement le renforcement des aspects d'intégration, mais les efforts à fournir restent importants. Pour Comelli (2008), il faut aussi assurer en parallèle la coordination permanente entre les différents acteurs par la gestion des communications, de l'information, des performances et des processus. C'est sur ces deux piliers, intégration et coordination, que reposent les objectifs de la gestion de chaîne logistique que sont la satisfaction client et la compétitivité.

1.2 Problématique de recherche

Considérant l'orientation actuelle de l'industrie de la construction, et la tendance à l'utilisation d'éléments en préfabriqués, nous nous inscrivons ici dans ce cadre pour réaliser un modèle. Notre projet de recherche consiste à développer un modèle de conception de la chaîne

logistique pour un projet de construction intégré à la phase I de planification et conception (voir Figure 1). La modélisation dans la première phase d'un projet de construction vise notamment à apporter une considération de la chaîne logistique au cours même de la conception du bâtiment. Nous voulons inclure ses problématiques dans le choix de solutions techniques prédéterminées pour la réalisation du projet, incluant notamment la possibilité de fabrication d'éléments hors site. Nous voulons par ailleurs que le modèle puisse favoriser l'implication de l'ensemble des parties prenantes dès le commencement du projet.

Nous cherchons en outre à obtenir une planification précoce des tâches à réaliser et de la chaîne logistique qui y est associée, incluant notamment les évolutions de stocks, les choix quant aux transports à réaliser et les fournisseurs à sélectionner. Nous nous inspirons pour cela de l'étude des modèles présents dans l'industrie manufacturière, pour prolonger le parallèle entre le développement des chaînes d'approvisionnement de ces deux industries constaté par Chaabane et al. (2018), et cherchons à adapter une méthode de modélisation pour le secteur de la construction. Nous nous basons sur une logique de construction et optimisation de la chaîne logistique en fonction des coûts, et utiliserons une programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP).

L'ensemble de notre projet vise ainsi à s'inscrire dans une démarche d'intégration entre les phases I et II de la Figure 1 d'un projet de construction pour assurer une vision d'ensemble précoce du déroulement pour tous les acteurs d'un projet et de sa chaîne logistique.

1.3 Méthodologie

Dans un premier temps, nous parcourrons la littérature pour établir un état de l'art dans la planification logistique de la construction, et avoir un aperçu des méthodes utilisées dans le secteur manufacturier. Nous nous proposons de développer un modèle qui permettra de faire un pas vers une logistique plus intégrée. Pour ce faire, nous proposons une démarche en trois étapes :

1. Par analogie entre l'évolution du manufacturier et de la construction, un modèle sera sélectionné pour servir de base à notre développement ;
2. Nous travaillerons sur ce modèle afin de le traduire pour le secteur de la construction et développer un premier modèle simplifié ;
3. Une fois le premier modèle basique fonctionnel, nous le remanierons pour y intégrer les problématiques et les contraintes spécifiques du domaine de la construction.

La première étape visera donc un choix de modèle qui permettra une adaptation cohérente aux spécificités du secteur de la construction. L'étude de la littérature et notamment de publication réalisant une évaluation d'ensemble de l'état de l'industrie de la construction et des modèles présent actuellement, nous permettra de dresser une vision des développements en cours et des besoins de l'industrie. Il s'agira en outre de constater les limites rencontrées dans les solutions actuelles pour se proposer d'y répondre sur certains points. L'identification de ces problématiques nous permettra de choisir des modèles parmi ceux de l'industrie manufacturière qui permettent d'y apporter une réponse, de comparer les différentes méthodes et avantages, puis de sélectionner celui qui permettra le meilleur parallèle avec le secteur de la construction.

L'objectif principal de la deuxième étape est de recréer le modèle choisi et de l'adapter au contexte de la construction. Nous ferons un choix de bâtiment à l'architecture simplifiée, auquel on appliquera le modèle adapté en respectant certaines particularités élémentaires (comme le fait que la construction se fait sur un site unique, et que les éléments livrés sont des pièces élémentaires du bâtiment). Dans un premier temps, ce modèle ne prendra pas en compte la quantité, comme c'est déjà le cas pour l'original. Il s'agira uniquement de créer le réseau de la chaîne logistique en minimisant les coûts, qui comprennent la fabrication, le transport et le stockage (selon une estimation semblable à celle du modèle initial), dans le but de s'assurer également de la faisabilité d'une telle démarche.

Enfin, la troisième étape viendra, une fois la démarche d'adaptation confirmée comme possible, affiner le modèle pour y introduire les problématiques fondamentales du secteur de la construction, notamment les problèmes de chronologie de la construction ; ainsi que la

gestion logistique des matériaux (quantités, délais, etc.). Il s'agira donc dans ce nouveau modèle d'inclure à l'adaptation précédente les problématiques écartées dans un premier temps. L'exemple d'architecture choisi précédemment sera donc légèrement complexifié, pour permettre de les intégrer. L'objectif de ce nouveau modèle sera alors d'avoir en sortie une chaîne de logistique complète avec une planification conçue simultanément à l'optimisation des coûts. Les résultats seront analysés dans une dernière partie de notre mémoire. Nous chercherons alors à tester la capacité de celui-ci à faire face aux différentes contraintes que nous aurons identifiées concernant un projet de construction. Les capacités du modèle à prendre en compte une les quantités de matériaux liées à un projet, à permettre une planification des tâches, à réaliser un choix sur les possibilités de réalisation d'un bâtiment, à présenter une chaîne logistique complète et à réagir aux variations des contraintes seront notamment évaluées pour permettre de le valider. La méthodologie de ce mémoire est représentée schématiquement par la figure 1.2.

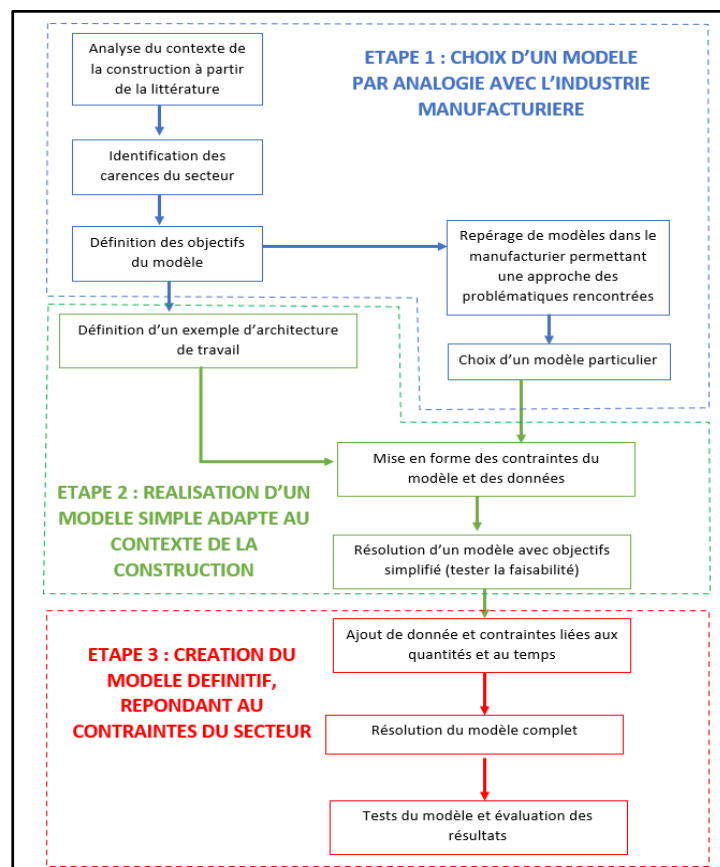


Figure 1.2 Méthodologie du mémoire

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Dans ce chapitre, nous dresserons à travers la revue de littérature un aperçu de ce qui existe actuellement dans l'industrie de la construction, et en parallèle dans l'industrie manufacturière. Nous verrons la définition, les enjeux ainsi que les axes d'amélioration de la chaîne logistique. Enfin nous verrons les modèles d'optimisation développés dans l'industrie manufacturière et dégagerons les perspectives que cela peut offrir à la construction. Notre objectif sera de dégager ici les éléments qui pourront être réadaptés dans un modèle de planification de la chaîne logistique du secteur de la construction.

2.1 Les évolutions en cours dans la chaîne logistique de la construction

Les entreprises et acteurs de l'industrie de la construction ont saisi le besoin d'améliorer la chaîne logistique dans ce secteur, au regard de l'industrie manufacturière. Dans cette dernière, Baud-Lavigne et al. (2016) mettent en évidence qu'une optimisation de la chaîne logistique et de la nomenclature des produits peut générer une augmentation des gains jusqu'à 25%. Le projet CIVIC (2018) met ainsi en évidence une série d'initiatives visant à améliorer le fonctionnement de chaînes d'approvisionnement pour la construction en Europe. Les villes d'Amsterdam, de Bruxelles, de Stockholm et de Vienne sont en particulier suivies sur les politiques qu'elles mettent en place pour permettre entre autres une meilleure conciliation des projets de construction et de la société environnante. Globalement ces villes fixent des cadres à respecter pour tous les projets, des cadres assez généraux même si Stockholm va jusqu'à imposer l'utilisation de centres de logistiques urbains pour mutualiser et organiser les flux arrivant dans les villes et rationaliser les transports urbains. Evrard Samuel et Cung (2015) font également état de centres de ce type, qu'ils nomment Espaces de Logistique Urbaine (ELU) et divisent en plusieurs catégories selon les missions assignées. Ces ELU ont l'avantage de répondre à des considérations à la fois économiques et environnementales (toutefois de façon limitée pour ces dernières), et permettent par un fonctionnement de type hub ou plate-forme de réduire la circulation des poids lourds en ville. Si Evrard Samuel & Cung (2015) considèrent

dans leur étude les activités logistiques liées à l'industrie manufacturière, on observe avec le projet CIVIC que ces méthodes s'étendent à la construction. De manière générale, l'intégration est une tendance en essor pour la chaîne logistique dans la construction. Cet essor pose des défis pour leurs gouvernances. Celles-ci doivent en effet répondre à un besoin de connaissances concernant les besoins et l'existant, de compréhension des changements requis et de leurs conséquences (CIVIC, 2018 ; Berden, 2017). Elles doivent démontrer une volonté de changement qui peut être entravée par les intérêts divergents des parties prenantes, et doivent faire face à des problématiques de capacités en termes de moyens (humains ou financiers), de ressources ou encore d'autorisations, etc. Enfin les gouvernances des chaînes d'approvisionnements doivent pouvoir assurer la mise en œuvre des changements, c'est-à-dire s'assurer d'avoir des bases logistiques suffisantes, suffisamment de demandes client, et assurer une implication précoce des acteurs pour lever les obstacles.

Berden (2017) relève une classification en quatre stades de la maturité d'une chaîne logistique, basée sur l'intégration des parties prenantes. Le premier stade est la « réaction en silos », c'est-à-dire une réaction dominée par les objectifs non coordonnés des parties prenantes, avec pour chacun ses processus et indicateurs clefs de performances (KPI). Le second est le stade de « l'évolutivité et la rentabilité », où les activités commencent à se regrouper au sein d'unités, des capacités de base en prévision et planification se développent et les KPI tendent vers les fonctionnalités de la chaîne logistique. En troisième stade on trouve la « prise de décision intégrée » où l'on a des décisions concernant l'ensemble de la chaîne logistique interne, des KPI qui couvrent la totalité de la chaîne et une considération précoce des acteurs. Enfin le quatrième stade de maturité est celui de « la collaboration dans la chaîne logistique » : la focalisation est faite sur la chaîne logistique extérieure avec la création de valeur en objectif principal, la chaîne est étendue et permet une visibilité en temps réel et les clients et fournisseurs travaillent en collaboration. La fragmentation de la chaîne logistique dans la construction et le manque d'intégration entre ses acteurs nous indiquent que celle-ci se trouve plutôt au premier stade de la maturité. Les efforts à apporter doivent donc viser la progression en maturité de la chaîne logistique dans le secteur de la construction.

Si l'intégration apparaît comme une question clef de l'amélioration des chaînes d'approvisionnement dans la construction, il convient de remarquer que cette notion couvre des aspects aussi divers que variés. Tsinoopoulos & Mena (2015) distinguent en effet quatre processus d'intégration distincts au travers de leur analyse de la littérature sur le sujet. Ils mettent en évidence que l'intégration, au sens de liens entre clients et fournisseurs aboutissant à un avantage concurrentiel, repose sur des facteurs internes et externes aux entreprises. Il en résulte que l'intégration se fonde sur des relations spécifiques et est donc un élément dynamique. Hors la plupart des études se concentrent sur les mécanismes d'intégration eux-mêmes, qui présentent une diversité importante selon la configuration et le contexte. Toutefois ils supposent en raison des contraintes l'existence de dimensions communes à plusieurs situations pour l'intégration. En étudiant les participations d'entreprises au Manufacturing excellence Awards, ils identifient deux dimensions contextuelles à l'intégration de la chaîne logistique et quatre catégories de stratégies de configurations. Les deux dimensions sont :

1. La structure des processus et la relation avec la demande client (degré de standardisation et quantité à produire) ;
2. La nouveauté d'un produit pour l'industriel.

Les quatre stratégies dégagées à partir de ces dimensions sont les suivantes :

1. L'intégration personnalisée : peu de volumes et produits nouveaux pour la firme. Cette stratégie implique une forte collaboration au début du projet, car il n'y a pas de spécification préalable du produit. Les relations reposent sur la confiance et peuvent être basées sur le long terme.
2. L'intégration récurrente : produits connus et en faibles volumes (à la demande). Les produits sont relativement connus par les clients et fournisseurs, ils appellent à des améliorations incrémentielles, impliquant une intégration dans les étapes tardives et qui visent à la communication des progrès pour gérer les phases du projet.
3. L'intégration progressive : il s'agit de produits nouveaux relativement standardisés et en gros volumes. L'intégration consiste en la réalisation de tests avec quelques clients grâce aux départements de marketing en lien avec la recherche et développement et l'ingénierie. Les changements fréquents de modèles de la demande client impliquent

une capacité de résolution et une flexibilité importante des fournisseurs, et donc des mécanismes d'intégration systématiques et structurés.

4. L'intégration coordonnée : les produits sont matures et relativement standardisés, et réalisés en gros volumes. Les mécanismes d'intégration consistent à partager l'information à l'échelle de la chaîne logistique et visent à une amélioration incrémentale du produit. Cette amélioration est réalisée par la collecte de retours d'expérience à grande échelle auprès des clients. Les coûts et la rapidité sont des critères essentiels.

Par analogie, on peut observer que les stratégies d'intégration pouvant correspondre à l'industrie de la construction sont celles d'intégration personnalisée et récurrente, en fonction des projets considérés. Elles correspondent en effet aux volumes de la construction, avec des réalisations dans ce secteur qui sont plus ou moins standardisées selon le type de construction à réaliser.

À cette catégorisation des stratégies, s'ajoute une division entre les niveaux de prise de décisions concernant la chaîne logistique, mise en évidence notamment par Comelli (2008) et CIVIC (2018). Il s'agit de distinguer trois niveaux de prise de décision : les niveaux stratégiques, tactiques et opérationnels. Le niveau de décision stratégique porte sur le long terme (quelques années), il fixe les grandes orientations telles que les relations et la sélection des partenaires récurrents, la localisation des sites de production et leurs capacités ou encore la stratégie de gestion des processus logistiques. Au niveau tactique, les décisions couvrent le moyen terme (quelques mois) et s'attachent à planifier la logistique : quantités à produire et transporter, vers quels sites, quand, etc. Enfin vient le niveau opérationnel, concernant le court terme (quelques jours ou semaines), il s'agit de coordonner au jour le jour les flux, gérer les demandes, la viabilité de la logistique, la sécurité, etc. La conséquence de ces trois niveaux de prise de décision est la nécessité de veiller à la cohérence verticale comme la nomme Comelli (2008), c'est-à-dire la cohérence entre les décisions prises à différents niveaux. Il faut en effet que les décisions prises au niveau tactique s'inscrivent dans celles prises au niveau stratégique et permettent dans le même temps la réalisation des décisions prises au niveau opérationnel.

De plus il faut que les décisions prises au niveau opérationnel respectent à la fois les décisions des niveaux stratégique et tactique, et que les décisions stratégiques permettent la réalisation de celles aux niveaux tactique et opérationnel.

Pour s'assurer de cette cohérence entre les différents niveaux de décision, Comelli (2008) établit trois approches permettant d'assurer la cohérence entre les niveaux décisionnels dans le cas de l'industrie manufacturière. Dans une première approche, il s'agit d'intégrer les contraintes opérationnelles dans la planification de la production. Premièrement un modèle génère un plan de production nommé $X(y)$ en prenant en paramètre un ordonnancement fixé des éléments de production. Ensuite, le modèle génère un nouvel ordonnancement $Y(x)$ à partir du plan créé précédemment. Cette navette entre les deux modélisations est répétée jusqu'à ce que toute la demande soit planifiée et que l'ordonnancement ne se modifie plus. Dans la deuxième approche, un modèle mathématique de planification est couplé à un modèle de simulation. Le premier établit en fonction de la demande et des capacités du réseau de production une planification optimale de la production qui sert ensuite de base au modèle de simulation. Celui-ci permet alors de recalculer les paramètres du premier modèle qui génère un nouveau plan de production et ainsi de suite jusqu'à convergence. La troisième approche couple trois modèles mathématiques. Le premier génère un plan de production qui sert de paramètre au second modèle, lequel doit générer un ordonnancement suivant le plan de production. S'il est impossible de trouver un ordonnancement, alors un troisième modèle en produit un dépassant le cadre du plan de production pour réajuster les capacités de production du réseau. Une fois ces capacités réajustées, le deuxième modèle retente un ordonnancement respectant le plan de production, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'une solution faisable soit trouvée.

2.2 Les outils à développer pour la gestion de la chaîne logistique

La gestion de chaîne logistique est en développement depuis le milieu des années 2000 dans l'industrie de la construction (et depuis le début des années 90 dans le secteur manufacturier).

Plusieurs outils ont donc déjà fait leur apparition, mais sont globalement freinés par leur manque de développement dans les entreprises et réseaux logistiques de la construction.

Le premier outil existant sous forme d'initiatives est mis en évidence par le projet CIVIC (2018). Il s'agit d'une méthode de gestion de la chaîne de logistique appelée « Smart gouvernance » qui se décompose en sept étapes d'un processus. Ces sept étapes sont les suivantes :

1. Créer une vision et une responsabilité commune entre les acteurs du réseau,
2. Développer une solution conceptuelle,
3. Fixer les politiques, les orientations et les accords au sein du réseau,
4. Impliquer les différentes parties prenantes du projet,
5. Sélectionner une solution,
6. Mesurer l'impact et le suivre tout au long de la chaîne et du projet,
7. Assurer une rétroaction permanente pour permettre une amélioration continue.

La réalisation de ces étapes permet d'intégrer plus efficacement les parties prenantes dans les décisions de la chaîne logistique, et ce le plus tôt possible.

L'autre outil à fort potentiel pour la construction est le Building Information Modeling (BIM) qui se traduit par Modélisation des Informations (ou données) du Bâtiment. Chaabane et al. (2018) définissent le BIM comme une représentation virtuelle numérique du projet de construction, notamment des caractéristiques physiques et fonctionnelles des installations. L'objectif de cet outil est d'accroître la collaboration entre les parties prenantes du projet tout au long de celui-ci, en particulier en étant un support efficace pour la décision. Forgues (2017) ajoute que le fonctionnement du BIM repose sur deux sphères. La première sphère regroupe les processus d'implantation, qui consistent en une intégration complète du BIM dans la chaîne logistique et ses composants, ainsi que la mise en place d'une collaboration à travers toute la chaîne, par un changement des pratiques et une synchronisation en temps réel des informations. Les deux documents insistent en effet sur le besoin d'implication des parties prenantes dans la démarche du BIM pour que celle-ci puisse fonctionner, c'est-à-dire avoir des informations à

jour en temps réel pour servir de base à la prise de décision. L'autre sphère consiste en la mise en place d'outils technologiques, capables de modéliser les données techniques et formelles. Il faut en outre que ces technologies permettent de favoriser les contrôles de qualités et les échanges, en vue d'établir une démarche d'amélioration continue.

Les obstacles qui se présentent à l'heure actuelle face à l'implantation du BIM sont la fragmentation importante de l'industrie de la construction qui rend complexe la mise en place ; la temporalité des projets qui n'incite pas à la mise en place d'un élément aussi complexe ; le manque de volonté pour changer les pratiques organisationnelles et contractuelles ; ou encore la nécessité d'avoir une pratique intégrée au niveau de l'organisation alors qu'il n'y a pas d'outil approprié, ce qui débouche sur une implémentation sans cadre du BIM (Forgues, 2017). Pour lever ces obstacles, Forgues (2017) suggère d'évaluer la maturité d'une entreprise vis-à-vis de l'implantation du BIM et de n'implanter que ce qui est compatible avec le stade de maturité. L'intérêt étant de pouvoir s'adapter au mieux au contexte et obtenir une efficacité maximale.

Le BIM est un outil en évolution constante, il est en effet au départ une modélisation 3D (toutes dimensions spatiales du projet), mais a progressivement inclus d'autres dimensions pour améliorer toujours la représentation du projet : 4D (dimension temporelle), 5D (quantités, échéances, prix), nD (durabilité, management, etc.). Il peut être ajouté autant de dimension que la structure installée le permet, car cela conduira à une collaboration toujours plus étroite au sein de la chaîne logistique.

2.3 La philosophie lean dans la chaîne logistique

Le lean est une philosophie de production, issue du Toyota Production System (TPS), qui se concentre sur l'élimination des gaspillages au sein du processus de production (Jasti & Kodali, 2015). Paksoy (2018) soutient également cette vision et repère dans la littérature sept sources de gaspillages que sont :

1. La surproduction,
2. L'attente,
3. Les transports,
4. Les processus inappropriés,
5. Les stocks inutiles,
6. Les procédures inutiles,
7. Les défauts.

Le lean management (LM) s'est progressivement étendu à la gestion de chaîne logistique (SCM) pour donner la gestion lean de chaîne logistique (LSCM). Mais pour Jasti & Kodali (2015) l'application du lean au SCM n'est pas évidente, car il s'agit de passer d'une application à la production à une application à un réseau de fournisseurs. Or dans la production les processus sont focalisés sur les flux de matériaux alors qu'ils sont focalisés sur les flux d'informations dans la chaîne logistique. De ce fait les pertes sont identifiables et quantifiables plus facilement dans la production que dans le SCM. À cela s'ajoute que la production peut être contrôlée par l'engagement du top management dans la production, alors que dans la SCM il faut l'engagement de tous les acteurs pour permettre un contrôle efficace de la chaîne logistique. Ces facteurs complexifient la mise en place du LSCM, et Jasti & Kodali (2015) constatent que le manque de vision globale dans le domaine entraîne l'échec de l'implémentation. Tortorella et al. (2017) constatent également la complexité de l'implémentation du LSCM, et dégagent d'une étude des pratiques huit piliers pour la réussite du LSCM :

1. La gestion des technologies de l'information,
2. La gestion des fournisseurs,
3. L'élimination des gaspillages,
4. La production en juste-à-temps,
5. La gestion des relations clients,
6. La gestion de la logistique,
7. L'investissement du top management,
8. L'amélioration continue.

Ils regroupent aussi l'ensemble des pratiques de LSCM en quatre lots : la gestion des relations clients-fournisseurs (CRSM), la gestion de la logistique (LOM), l'élimination des gaspillages et l'amélioration continue (EWCI), et l'investissement du top-management (TMC).

Jasti & Kodali (2015) constatent la même répartition des huit piliers du LSCM. En revanche, ils pointent l'incohérence dans la théorie du LSCM du fait que les cadres proposés dans la littérature sont la plupart du temps nouveaux. Peu de cadres sont établis en considérant un cadre ancien, résultant sur leur grande diversité et une incohérence. Par ailleurs, il souligne que peu de ces cadres sont vérifiés en pratique. Pour y remédier, ils soulignent l'importance pour un cadre général de remplir les caractéristiques suivantes : le respect des huit piliers, se baser sur les opinions des consultants, professionnels ou académiciens (pour dépasser l'incohérence actuelle), être le plus général possible.

Paksoy (2018) ajoute à la gestion de chaîne logistique le concept de Vert (GSCM). Il s'agit dans ce concept d'inclure à la gestion de chaîne logistique des pratiques comme l'efficacité énergétique, la réduction des gaz à effet de serre, la diminution des déchets, la gestion de l'eau, etc. Il constate que la mise en place du LSCM et GSCM en coordination permet l'accroissement des performances de la chaîne logistique. Mais il met en garde aussi contre le manque de cohérence entre les deux méthodes, car certains aspects sont contradictoires et peuvent aboutir à l'annihilation de leurs apports mutuels. Paksoy (2018) met en évidence les bénéfices vis-à-vis de la performance à développer une chaîne logistique dite LARG : Lean, Agile (réactive aux variations des besoins du marché), Résistante (qui possède une visibilité sur les stocks et conditions d'approvisionnement), et verte (Green). Pour assurer une implantation réussie de ce type de chaîne logistique, il souligne que le cadre d'application doit inclure des composantes clefs : le leadership, la planification stratégique, les processus et les résultats, la prise en compte des personnes et des parties prenantes.

Enfin, dans une étude de cas concernant les entreprises d'industries de production au Brésil, Tortorella et al. (2017) dégagent des caractéristiques de l'implantation du lean dans la chaîne

logistique. Ainsi, ils mettent en évidence que ce sont les entreprises 3^e ou 4^e tiers (donc plus loin du consommateur final) qui sont le plus susceptible d'implanter efficacement une stratégie lean. De même, ils montrent que la taille d'une entreprise jouera en faveur de l'implantation du LSCM, mais paradoxalement une tradition de production lean dans l'entreprise n'est pas un facteur de réussite pour l'implantation du LSCM. Enfin, ils remarquent qu'il existe une corrélation entre le fait qu'une entreprise lean relie de nombreux fournisseurs sur le terrain et la réussite d'une implantation du LSCM, à l'exception des pratiques EWCI.

Les différentes publications s'accordent donc à dire que l'implantation du LSCM, si elle permet d'augmenter les performances de la chaîne logistique, se révèle complexe. En particulier, les auteurs pointent l'absence d'un cadre général permettant cette implantation et au contraire une incohérence de la théorie due à l'abondance de recherche produisant des cadres nouveaux. Ils recommandent donc de baser la recherche future sur des cadres préexistants. Ils recommandent aussi de développer la vérification des cadres pour les rendre plus réalistes, ainsi que d'adopter une approche moins qualitative par le développement de modèles mathématiques.

2.4 Modèles développés pour la conception de chaînes logistiques

Une analyse des modèles de chaîne logistique dans la construction, produits entre 2004 et 2018, menée par Chaabane et al. (2018) permet de mettre en évidence la faible quantité de ceux-ci. Une cinquantaine de modèles sont identifiés et analysés, soulignant le besoin d'étoffer les études dans ce domaine. En outre, la comparaison avec le secteur manufacturier et les liens avec la construction sont un champ encore peu exploité de la recherche. L'analyse des modèles fait état d'une faible quantité de modèles focalisée sur les phases de conception et d'approvisionnement (phases I et II de la Figure 1). La plupart se concentrent en effet sur la gestion des matériaux et l'approvisionnement, mais peu prennent en compte les processus de production et d'assemblage d'un bâtiment.

Constatant ces manques dans la recherche concernant la chaîne logistique de la construction, nous choisissons de nous focaliser sur ces aspects, en cherchant à créer un modèle d'optimisation qui établisse un pont entre les secteurs manufacturiers et de la construction. Nous avons vu dans les points précédents des éléments de prise de décision au niveau stratégique (politiques d'encadrement de la chaîne logistique de construction, outils, méthodes, etc.), et nous cherchons à développer notre modèle comme un lien entre ces éléments stratégiques et le niveau tactique, qui voit notamment la planification du projet se mettre en place et se réaliser des choix structurants du projet. Notre modèle s'inspirera ainsi d'un modèle développé dans le manufacturier qui à la fois permet la conception de la chaîne logistique et influe sur les choix d'architecture. Six modèles de conception de la chaîne logistique dans l'industrie manufacturière sont ici présentés qui représentent des pistes intéressantes pour nos objectifs. Leurs méthodes de résolution variées, que nous présentons ici, nous offrent la possibilité de choisir celle qui conviendra le mieux à notre objectif d'adaptation vers l'industrie de la construction.

2.4.1 Modèle développé par Chiu & Okudan (2011)

Chiu et Okudan (2011) développent un modèle visant à définir une méthode combinant et rationalisant la prise de décisions relatives aux conceptions du produit et de la chaîne logistique. Dans ce modèle, il s'agit de comparer les différentes possibilités d'architectures de produit et les réseaux de chaîne logistique qui en découlent. Pour ce faire, le modèle suit les étapes présentées en Figure 1.1. La collecte d'information sur les besoins permet de générer les fonctions qui seront nécessitées par le produit et les différentes solutions pour fournir ces fonctions au sein d'une base de données. À partir de ces informations, un panel de solutions architecturales possibles est mis en place. Une fois générées les différentes architectures possibles, celles-ci sont évaluées par un indice de conception pour l'assemblage (DfA). Ce DfA, calculé grâce à la formule (2.1) évalue une architecture proposée sur 13 critères relatifs aux composants, au produit ou à l'assemblage : poids, nombre de composants uniques, rigidité, longueur, présence de composants de base, impact de la vulnérabilité, forme, taille, mouvement

de composition, direction de composition, symétrie, alignement, et méthode d'assemblage. Chaque critère i recevant une note P_i comprise entre $V_{(max,i)}$ et $V_{(min,i)}$ ($i = 1, \dots, 13$).

$$DfAindex = 10 \left(\sum P_i - \sum V_{min,i} \right) / \left(\sum V_{max,i} - \sum V_{min,i} \right) \quad (2.1)$$

Tiré de Chiu & Okudan (2011, p.5)

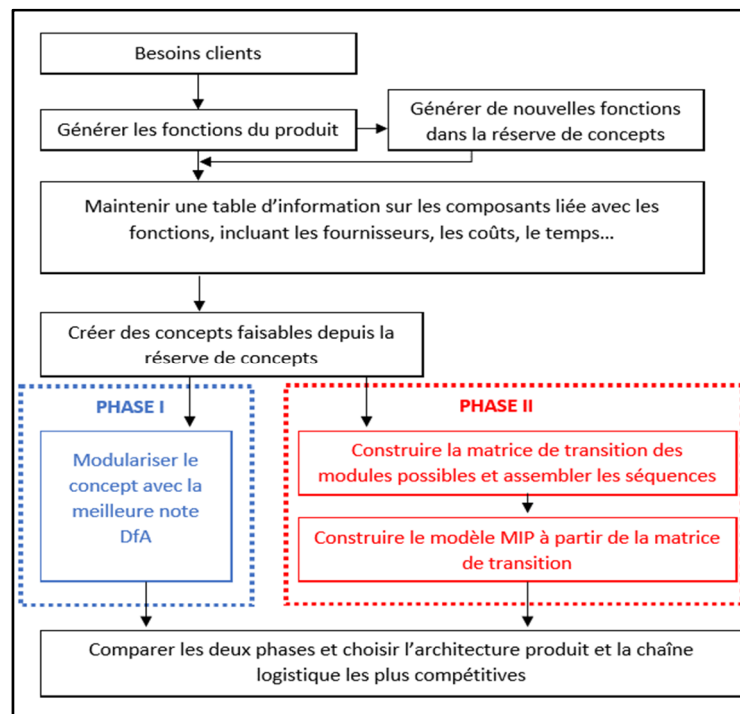


Figure 2.1 Méthodologie du modèle d'optimisation
Adapté de Chiu et Okudan (2011, p.4)

La configuration possédant le meilleur indice DfA est passée dans la Phase I où la modularisation est mise en place. Les autres sont envoyées dans la Phase II où une matrice de transition détaille les séquences et configurations possibles et un programme en nombres entiers mixte (MIP) construit la chaîne logistique optimisée selon les critères de coûts (processus, transports et stocks) ou de temps de réalisation. Les résultats de la phase I et de la phase II sont ensuite comparés pour adopter la meilleure option. La fonction-objectif est la

fonction qui minimise les coûts de processus (C_1), de transports (C_2) et de stock (C_3), exprimés par les équations (2.1), (2.2) et (2.3):

$$C_1 = \sum_p \sum_i C_{pi} \times X_{pi} + \sum_p \sum_j C_{pj} \times X_{pj} + \sum_p \sum_k C_{pk} \times X_{pk} \quad (2.2)$$

$$C_2 = \sum_p \sum_i \sum_j \text{TRANCX}_i X_j \times X_{pi} \times X_{pj} \quad (2.3)$$

$$+ \sum_p \sum_j \sum_k \text{TRANCX}_j X_k \times X_{pi} \times X_{pk}$$

$$C_3 = \alpha \times C_1 + \beta \times C_2 \quad (2.4)$$

Tiré de Chiu & Okudan (2011, p. 5 et 6)

Où $\text{TRANCX}_i X_j$ est le coût de transport du site i au site j . La fonction-objectif est donc : Min ($C_1 + C_2 + C_3$). La somme des coûts est limitée par une valeur plafond C_MAX . Le temps de réalisation est également calculé selon la formule suivante et encadrée par une valeur min et une valeur max fixée par les contraintes et exigences sur le modèle (cf. Annexe I) :

$$\text{LEAD} = \text{Max}(X_{pi} \times L_{pi} + \text{TRANTX}_i X_j + X_{pi} \times L_{pj} + \text{TRANTX}_j X_k \quad (2.5)$$

$$+ X_{pk} \times L_{pk})$$

Tiré de Chiu & Okudan (2011, p. 7)

Une fois calculés les paramètres de la phase deux les caractéristiques des modèles obtenus dans les deux phases permettent en les comparant d'opter pour la solution la plus efficace pour la chaîne logistique et l'architecture du produit. L'étude dégage comme principe que l'implication précoce des acteurs de la chaîne logistique dans la phase de conception de l'architecture du produit permet des avantages concurrentiels. En revanche Chiu et Okudan (2011) soulignent dans ce cas la diminution de la flexibilité et de la diversité des chaînes logistiques, ce qui est utile dans le cas de produits mature, mais risqué en cas de produit faisant face à une demande massive et soudaine. Ils soulignent également le rôle de leur étude en tant qu'aide à la prise de décision pour le succès d'un produit et de l'entreprise, ainsi qu'en tant qu'outil de communication au sein de la chaîne logistique.

2.4.2 Modèle de Khalaf et al. (2011)

Khalaf et al. (2011) mettent en place un modèle visant à trouver le lot de module le plus amène de permettre l'assemblage du produit final dans un temps de réalisation prédéfini. Ce modèle s'assure également que le produit corresponde aux besoins, c'est-à-dire qu'il n'a pas d'options superflues et que toute la chaîne logistique entre en considération dans la conception de la famille de produits. Le modèle ainsi défini vise à permettre la prise de décisions stratégiques sur le long terme. Aussi il ne considère pas les temps de trajet, car ils les jugent prises en compte au niveau opérationnel, il ne considère pas non plus les problèmes d'interfaces entre modules, car les assimile à des fonctions présentes ou non dans les modules en question. Enfin, le modèle considère que la partie commune de la famille de produits a déjà été déterminée. La structure générale de la chaîne logistique est composée de deux phases : une première phase qui réalise le pré-assemblage des modules dans des usines dites distantes, directement en relation avec les fournisseurs. Elles fournissent les usines de la deuxième phase (usines de proximité) qui réalisent le processus Assemblage à la commande sur un délai court avant de fournir au client final.

Pour parvenir à l'objectif, Khalaf et al. (2011) utilisent une programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) qui aura pour fonction-objectif (2.6) une fonction minimisant les coûts d'assemblages et coûts d'approvisionnements, fixes et variables, simultanément.

$$Z = \min \left(\sum_{j=1}^m F_j^A Y_j + \sum_{j=1}^m V_j^A \left(\sum_{i=1}^n D_i X_{ij} \right) \right) + \left(\sum_{l=1}^s \sum_{j=1}^m F_{jl}^P Y_{jl} + \sum_{l=1}^s \sum_{j=1}^m V_{jl}^P Q_{jl} \right) \quad (2.6)$$

Tiré de Khalaf et al. (2011, p.3)

La composante variable est nommée Z^A et représente les coûts endurés sur les usines de proximité (celles qui réalisent la phase Assemblage à la commande), tandis que la composante fixe est nommée Z^P et représente les coûts endurés sur les usines distantes (qui assurent le pré-assemblage des modules).

Ce MILP est utilisé au sein d'un algorithme de recherche taboue (TS) qui permet de tester les différentes alternatives à la nomenclature pour trouver la plus optimale possible. Le principe du TS est qu'il procède par itération en s'interdisant le retour sur une option déjà testée (taboue). La phase d'initialisation permet de générer une solution initiale par la résolution de la programmation en nombre entier (ILP), qui donne une nomenclature initiale. Chaque module de cette nomenclature est ensuite assigné à une usine distante grâce à l'ILP. Les modules sélectionnés dans la solution en cours sont répertoriés dans un ensemble M' . Ensuite commence la phase itérative (étapes 3 à 8).

L'itération commence avec l'étape 3 qui vise à éliminer un module de M' pour définir un nouveau sous-ensemble de module pour la solution à établir. Quatre critères d'élimination sont possibles, l'un d'eux est sélectionné selon une loi uniforme. Les critères évaluent pour certains selon le degré du module, ce qui correspond au nombre de produits finis qui sont compatibles avec lui, c'est-à-dire pour qui le module ne présente pas d'option superflue. Ces critères sont :

1. Module de degré faible ;
2. Module générant de hauts coûts d'approvisionnement ;
3. Module de haut degré (probabilité de coûts élevés) ;
4. Aléatoire.

La faisabilité de la nouvelle nomenclature est vérifiée par la résolution de l'ILP. Si la nouvelle nomenclature est impossible, une insertion d'un module a lieu selon l'un des quatre critères suivants sélectionnés par une loi uniforme, avant que la faisabilité ne soit retestée :

1. Module générant peu de coûts d'approvisionnement ;
2. Module de haut degré absolu (sans considération pour la faisabilité des produits finis) ;
3. Module de haut degré relatif (en ne considérant que les produits finis non faisables) ;
4. Module permettant la faisabilité d'une nomenclature pour un produit non-faisable en l'état actuel.

Si la nomenclature est en revanche faisable alors une routine de réoptimisation a lieu qui élimine les modules inutiles, issus des insertions précédentes, met à jour les données utilisées

par d'autres routines, et assigne les modules de M' aux usines à distance par la résolution de l'ILP avec pour fonction objectif Z^p . Si la nouvelle solution obtenue est meilleure que l'ancienne alors elle est enregistrée et testée au critère de sortie, la boucle reprend à l'étape 3. Le critère de sortie est en réalité un multicritère qui considère le temps de calcul et le nombre d'itérations réalisées sans amélioration de la fonction-objectif.

Les expérimentations entreprises montrent que le TS permet d'obtenir de bonnes améliorations, et converge toujours vers des solutions de petite taille. Les modules de hauts degrés étant en effet souvent gardés, le nombre final de modules est réduit. Par ailleurs, ils constatent que l'algorithme influence plus fortement l'assemblage que la phase d'assignation des modules.

2.4.3 Modèle de Nepal et al. (2012)

Nepal et al. (2012) développent un modèle ayant pour but de servir de support pour la conception d'une chaîne logistique adaptée au mieux à la structure du produit. Pour ce faire ils proposent un processus en trois étapes :

1. Sélection de la stratégie architecturale et des réseaux de SC correspondants,
2. Évaluation des fournisseurs potentiels,
3. Configuration optimale de la chaîne logistique.

Tableau 2.1 Facteurs clefs et sous-facteurs de compatibilité dans la chaîne logistique

Structurel (indice structurel)	Alignement culturel
	Communication
	Partage d'information
	Coordination
	Coopération
Managérial (indice managérial)	Confiance
	Engagement managérial
	Objectifs stratégiques compatibles
	Technique de gestion de conflits
Financier (indice financier)	Marges de profits
	Retour sur investissement
	Notation des obligations

2.4.3.1 Tâche 1 : sélection de la stratégie architecturale et des réseaux correspondants

Une nomenclature générale (GBOM) est sélectionnée pour représenter les relations modulaires, puis la chaîne logistique correspondante est développée, sous forme d'un réseau multi-échelon.

2.4.3.2 Tâche 2 : évaluation de la compatibilité des fournisseurs potentiels

Il s'agit ici d'évaluer les fournisseurs potentiels grâce à un indice de compatibilité, se basant sur trois facteurs clefs, eux-mêmes divisés en 12 sous-facteurs. Ces facteurs et sous-facteurs sont présentés dans le Tableau 2.1. De ces trois facteurs sont fixés trois indices, respectivement :

1. L'indice d'alignement structurel (SI),
2. L'indice d'alignement managérial (MI),
3. L'indice d'alignement financier (FI).

Ces trois indices permettent ensuite de calculer l'indice de compatibilité, qui sert à la sélection des fournisseurs potentiels. Plus il est élevé, plus le fournisseur est susceptible d'être sélectionné. L'indice de compatibilité est donné par la formule qui suit :

$$\beta_i = w_1 \times SI_i + w_2 \times MI_i + w_3 \times FI_i \quad (2.7)$$

Tiré de Nepal et al. (2012, p.4)

Où w_1, w_2, w_3 sont des facteurs de pondération en nombres entiers.

2.4.3.3 Tâche 3 : Faire correspondre l'architecture produit et la configuration de SC

Un modèle mathématique multi-objectif est généré utilisant un algorithme génétique, dont la fonction-objectif vise à minimiser les coûts totaux de la chaîne logistique et maximiser les indices de compatibilités entre ses membres :

$$\text{Minimise } \left\{ \sum_{i \in N} [h_i(C_i \times AOH_i) + (W_i \times WIP_i)] + (H \times c_i \times \mu_i) \right\} \quad (2.8)$$

$$\text{Maximize } \left\{ \sum_{i,j \in A} \beta_{i,j} \right\} \quad (2.9)$$

Tiré de Nepal et al. (2012, p.5)

Sont introduites les notations λ_{TSCC} et λ_{CI} , représentant respectivement les valeurs optimales de coûts totaux et d'indice de compatibilité, respectivement obtenu pour la résolution de modèles mono-objectifs d'optimisation des coûts et d'optimisation de compatibilité. De même sont introduits w_{TSCC} et Δ_{TSCC} (poids accordé aux coûts totaux, et variation des coûts par rapport à l'objectif), ainsi que w_{CI} et Δ_{CI} (poids accordé à l'indice de compatibilité, et variation de l'indice de compatibilité par rapport à l'objectif). Ces notations permettent d'exprimer la fonction-objectif sous une forme pondérée :

$$\text{Minimise } \left\{ w_{TSCC} \left(\frac{\Delta_{TSCC}}{\lambda_{TSCC}} \right) + w_{CI} \left(\frac{\Delta_{CI}}{\lambda_{CI}} \right) \right\} \quad (2.10)$$

Tiré de Nepal et al. (2012, p.5)

Cette fonction est soumise à une série de contraintes.

Deux études de cas sont réalisées pour valider l'universalité du cadre, et s'assurer de l'amélioration de la compatibilité et de la stabilité de la chaîne logistique. Deux chaînes d'approvisionnement de deux secteurs industriels manufacturiers sont donc testées : la première est la chaîne pour la construction de bulldozer, la seconde pour la fabrication de système de climatisation automobile. Ces deux études permettent de montrer dans les deux cas des améliorations de la chaîne logistique, avec plusieurs pratiques managériales pouvant être dégagées. Premièrement, Nepal et al. (2012) observent que l'augmentation du nombre de nœuds dans la chaîne logistique permet d'augmenter sa flexibilité, et que parallèlement l'augmentation du degré de modularité de l'architecture du produit implique une augmentation du nombre de nœuds. Deuxièmement, une corrélation est mise en évidence entre le degré de modularité et le degré de compatibilité. Un haut degré de compatibilité va en effet de pair avec un haut degré de modularité pour avoir une chaîne logistique efficace, et inversement un degré de compatibilité faible doit être couplé avec un degré de modularité faible pour être efficace. Enfin, les auteurs distinguent quatre façons d'utiliser le cadre qu'ils ont établi :

1. En tant que ligne de conduite pour évaluer les décisions stratégiques d'architecture de produit ;
2. En qu'aide à la conception des stratégies de nomenclature par la prise en compte des performances de la SC ;
3. Pour explorer les avantages et inconvénients des différentes stratégies ;
4. Pour améliorer l'efficacité et la stabilité de la SC.

2.4.4 Modèle développé par Benkaddour (2007)

La thèse de Benkaddour (2007) se concentre sur le secteur aéronautique et se pose pour objectif la conception d'un réseau logistique en prenant en compte les choix faits sur la nomenclature du produit, une nomenclature définie comme convergente. Pour ce faire il introduit la notion de « modularisation ». La modularisation consiste à introduire de l'interchangeabilité et de la standardisation. La thèse identifie la modularisation dans la conception du produit, dans la production et dans l'organisation inter-firmes. La modularisation de la production est la seule à laquelle s'intéresse Benkaddour (2007), et il la définit selon deux possibilités : les sous-assemblages, ou les « kit ». Le sous-assemblage consiste en des pièces assemblées ensemble, possédant un identifiant unique commun, et il est réalisé par les ingénieurs de conception et fabrication. À ce titre, ce type de modularité est écarté du modèle. En revanche le « kitting » est considéré dans la thèse, il consiste à regrouper ensemble des pièces non assemblées, mais organisées et placées dans un même contenant pour optimiser les flux de matériel. Le modèle de Benkaddour (2007) fait intervenir des conceptions stratégiques et tactiques. Stratégiques, car il s'agit de choisir les fournisseurs de matière première, les sous-traitants, les sites de production et les pièces dites « orphelines » à attribuer à un kit. Tactique, car il s'agira également de choisir les quantités de matériaux à commander, les quantités à produire, les quantités à transporter, et à répartir ces quantités entre les acteurs et les sites de production.

La modularisation entraîne une nouvelle stratégie de la Chaîne logistique pour répondre aux demandes des clients, ainsi qu'une réorganisation des processus. La chaîne logistique passe en effet d'un niveau (les fournisseurs sont en contact direct avec l'entreprise principale pour la fournir) à plusieurs niveaux : les tâches sont groupées il y a une collaboration entre les différents fournisseurs et on aboutit à une organisation où tous les fournisseurs n'approvisionnent plus l'entreprise principale, mais pour certains d'autres fournisseurs intermédiaires. Le modèle généré par Benkaddour (2007) se penche sur une nomenclature convergente (moteur d'avion) et prend en paramètres les coûts fixes et variables, la nomenclature du produit et les capacités dans les différents centres. Les variables binaires du

modèle représentent les décisions sur le plan stratégique tandis que les variables continues représentent les décisions tactiques.

L'objectif du modèle est la diminution des coûts de la chaîne logistique. Pour ce faire la fonction-objectif à minimiser reprend les coûts suivants :

1. Coûts fixes d'affectation des produits aux sites ;
2. Coûts fixes d'affectation des pièces orphelines aux modules et sous-traitants ;
3. Coûts d'approvisionnement en matières premières et de production des modules et composants ;
4. Coûts de transport des matières premières, produits semi-finis et produits finis.

À cela se joignent les contraintes liées à la chaîne logistique et auxquelles est soumis le programme :

1. Équilibre des produits aux différents nœuds ;
2. Respect des capacités des sites et fournisseurs ;
3. Contrainte de capacité minimale à occuper ;
4. Respect de la nomenclature des produits ;
5. Satisfaction de la demande.

Enfin, le modèle intègre une série d'autres contraintes qui sont propres aux critères choisis, comme le nombre maximal de produits par sites, les conditions d'affectation d'une pièce orpheline à un module, etc.

Le test du modèle avec deux exemples. Le premier est le cas d'une turbine haute pression avec une quantité de 1 000 unités finies à fournir, cet exemple est utilisé pour évaluer la validité des résultats fournis par le modèle. Le second exemple est un cas réel de moteur d'avion, possédant 789 composantes dans la nomenclature, 40 sous-traitants possibles, et 17 pièces orphelines à répartir. Le modèle est ensuite soumis à une étude de sensibilité, faisant varier les coûts, fixes, les coûts variables, les coûts de transports, les temps de fabrication... Il ressort de cette analyse que le modèle présenté est sensible aux coûts de sous-traitance et de transports qui sont donc

des critères clés du modèle, ainsi qu'au temps de fabrication impliquant la nécessité de prévoir ces derniers avec précision.

Le modèle de Benkaddour (2007) présente la particularité d'être adaptable à de nombreux secteurs de l'industrie, et de pouvoir bénéficier d'ajouts de considérations variées sur la chaîne logistique.

2.4.5 Modèle de Paquet et al. (2006)

Le modèle de Paquet et al. (2006) se donne pour objectif de maximiser les profits associés à la réorganisation d'un réseau de production existant, dans un contexte de demande stochastique très variable. Pour ce faire, les auteurs utilisent une solution itérative telle que présentée sur la Figure 2.2.

Ce modèle comporte donc deux phases. La phase initiale se décompose en trois étapes :

1. Définition des localisations potentielles et choix des fournisseurs, usines... qui pourraient y être implantées. Définition des besoins en matériaux ;
2. Choix des différentes configurations possibles pour chaque centre (le choix doit être assez vaste pour permettre la flexibilité de la conception du réseau) ;
3. Définition d'un ensemble d'offres potentielles de marché de produit.

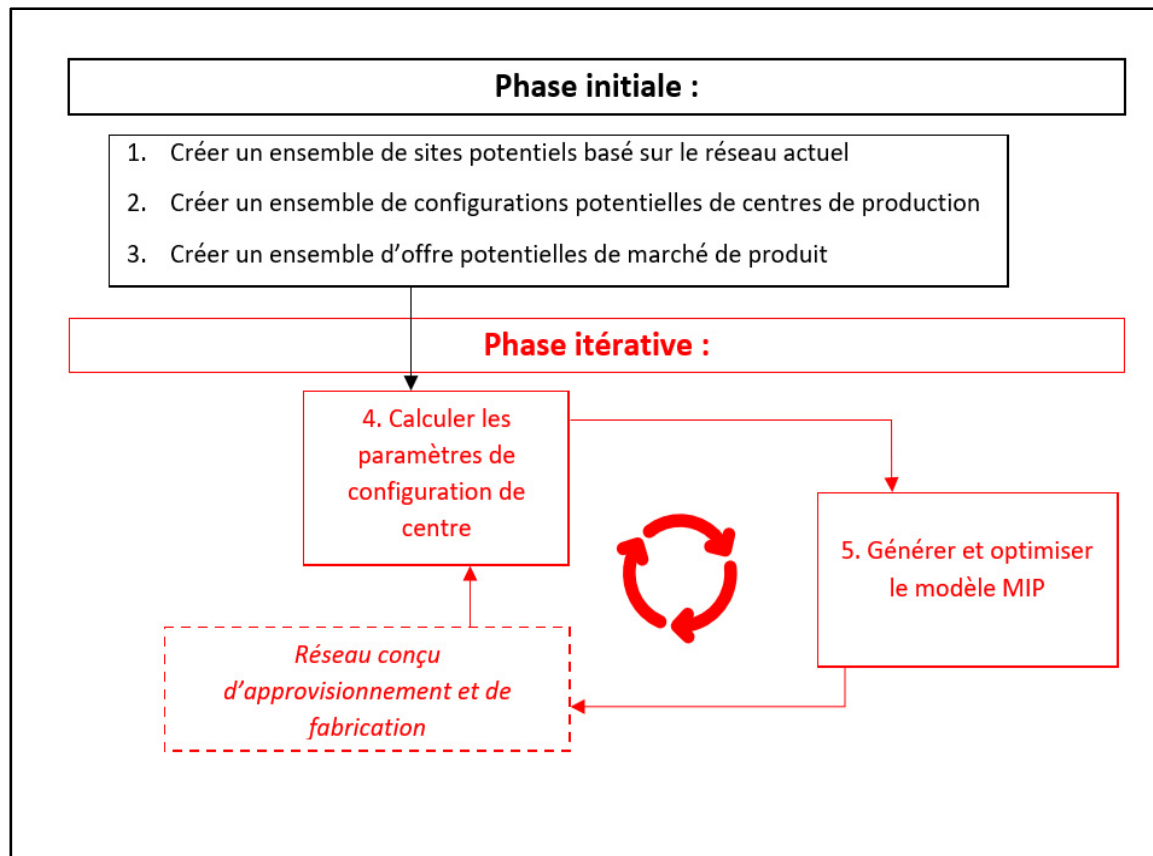


Figure 2.2 Méthodologie du modèle

Adapté de Paquet et al. (2006)

Ces trois étapes créent un réseau potentiel d'approvisionnement et de production que la seconde phase, itérative, devra optimiser. Cette phase itérative comprend deux étapes. D'abord l'estimation des paramètres de configuration des centres, en partant de l'aval pour remonter tout le réseau, ensuite un modèle de programmation en nombre entier est exécuté et détermine le meilleur réseau suivant les estimations. Les deux phases s'enchaînent jusqu'à atteindre une configuration et des valeurs de paramètres inchangées. Une étude expérimentale démontre la faisabilité de la méthode, et étudie l'impact sur le réseau des variations des paramètres (tarifications, stratégie de stockage, ...). Il apparaît que le modèle est sensible au niveau de demande et implique un besoin plus important de ressource lorsque la variabilité de celle-ci augmente, diminuant les profits. Le modèle développé est donc capable de s'adapter face à des situations changeantes, mais les résultats présentent une grande variabilité.

2.4.6 Modèle de Martel (2005)

Martel (2005) rappelle que la nature d'un réseau de production-distribution dépend du contexte industriel : si la production est à la demande ou si l'on utilise des stocks, si la nomenclature est convergente ou divergente (une matière première pour plusieurs produits finaux), ou si la dimension du réseau est internationale ou nationale. Le modèle développé par Martel (2005) correspond à un réseau international, réalisant des produits pour faire du stock, avec un processus convergent. Il cherche à travers ce modèle à évaluer l'impact de divers éléments de conception du réseau, et à inclure les problématiques pratiques qui ont une influence importante sur ce réseau. Le critère d'optimisation retenu dans le modèle est la maximisation des revenus nets du réseau de production-distribution. Le réseau considéré se base sur des arcs (approvisionnement, interne, demande) et comprend également 3 types de nœuds : les vendeurs externes, les sites de production-distribution ou distribution potentiels, et les zones de demande. Il s'agit alors de trouver la cartographie optimale de ces structures en résolvant un programme linéaire en nombre entier mixte (MILP).

La résolution du programme se fait par un processus itératif, basé sur des approximations raisonnables sur les débits de stocks. Le programme est alors arrêté lorsque l'écart entre les valeurs de deux itérations successives est inférieur à une valeur suffisamment petite. Le modèle a été implanté dans une version plus générale sur une chaîne logistique commerciale, et cherchait à la date de sa publication à étendre les résultats à un contexte de fabrication à la demande, ainsi que sur des processus divergeant.

2.5 Discussion et pistes d'adaptation au secteur de la construction

À partir de cette revue de littérature, nous souhaitons dégager un modèle permettant de s'adapter aux problématiques de la construction pour pouvoir le transposer à cette industrie. Il faut donc considérer l'unicité de chaque projet de construction, chaque site étant différent, incluant des éléments pouvant être standardisés et répartis en modules. Le cadre développé doit pouvoir servir aux entrepreneurs d'un projet de construction pour lui permettre d'être informé des conditions de réalisation du projet d'influencer sur la conception du bâtiment afin

d'être le plus efficace pendant la réalisation. La simplicité du principe du modèle sera un critère important pour permettre la démarche d'adaptation, elle est estimée empiriquement au niveau de l'objectif du modèle, de la méthode utilisée et de la formulation du modèle. Nous comparons donc les différents modèles sur la base de ces critères qualitatifs, pour déterminer celui qui correspond à nos besoins, dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.2 Comparaison des caractéristiques des modèles présentés

MODÈLE N° :	2.4.1	2.4.2	2.4.3	2.4.4	2.4.5	2.4.6
OBJECTIF	Min. coûts et temps	Min. coûts	Min. coûts + max. compatibi lité	Min. coûts	Max. profits	Min. coûts
INCLUSION DU TEMPS		✓				
INFLUENCE L'ARCHITECTURE	✓	✓		✓		
SIMPLICITÉ	✓					✓
ADAPTABLE A D'AUTRES CONTEXTES	✓		✓	✓		
PLANIFICATION						

Considérant l'appréciation faite des différents modèles présentés, le cadre développé par Chiu & Okudan (2011) se révèle intéressant. Il permet une utilisation pour des chaînes logistiques de produits nouveaux ou déjà existants. Par ailleurs, la méthodologie utilisée détaille le processus de conception précoce avec des possibilités d'inclure les fournisseurs. Cela permet de construire une analogie avec le secteur de la construction en adaptant étape par étape le cadre au secteur. En outre, il apporte des possibilités intéressantes comme la matrice de transition (qui permettent de représenter de la modularité) ou la focalisation sur les processus. Ce modèle relativement simple sera donc utilisé comme première étape pour construire un parallèle entre les méthodes utilisées dans l'industrie manufacturière et celle à développer dans le secteur de la construction.

On s'attellera à détailler à chaque étape du cadre une possible adaptation au secteur de la construction, avec les enjeux à prendre en compte. Nous essayerons de dégager dans les

sections à venir les pistes pour appliquer ce cadre à la chaîne logistique dans l'industrie de la construction.

2.5.1 Adaptation générale du cadre au contexte de la construction

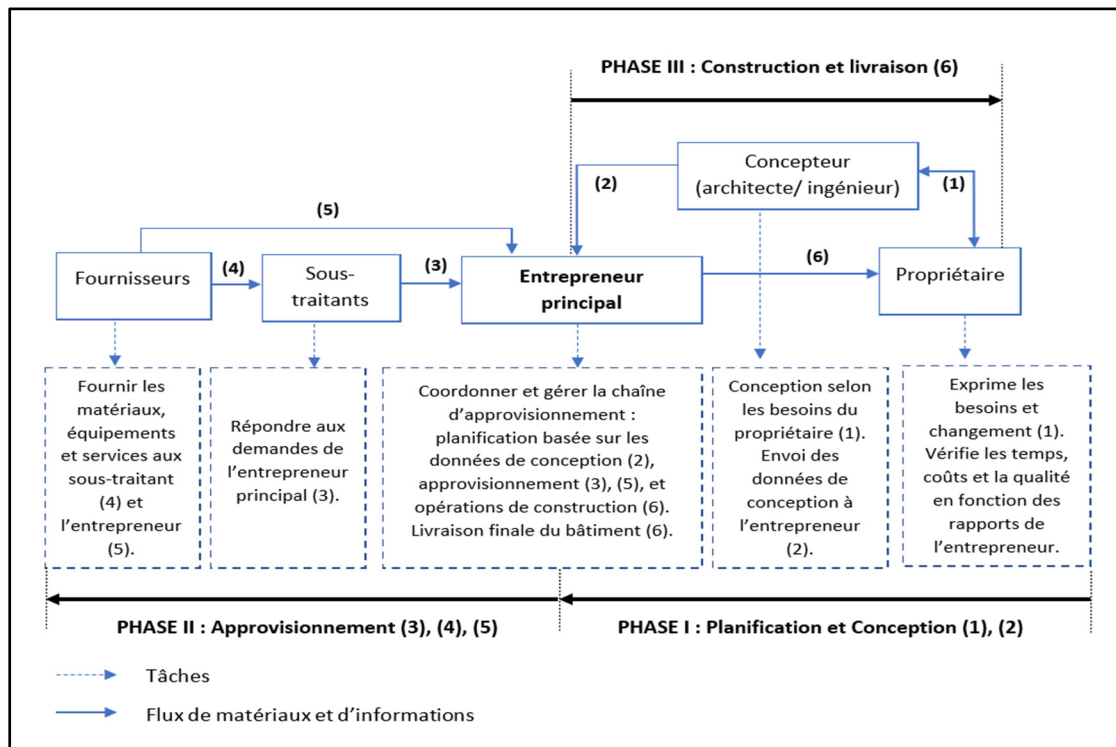


Figure 2.3 Répartition des activités d'un projet de construction
Adapté de Phuoc Luong Le, Walid Elmughrabi, Thien-My Dao & Amin Chaabane (2018, p.3)

Nous avons vu dans les lectures précédentes l'organisation en trois phases d'un projet de construction (Le et al., 2018). Ces trois phases correspondent à la planification et conception, l'approvisionnement, et la construction et livraison du projet. Les phases nous intéressant donc pour la transposition du cadre sont donc particulièrement les phases I et II (Figure 2.3).

Dans cette configuration classique, l'entrepreneur principal reçoit du concepteur les informations de la conception et peut éventuellement lui faire parvenir un retour. Il conviendrait ici pour inclure le cadre de conception d'intensifier cet échange entre le concepteur et l'entrepreneur principal dans l'étape (2) de la figure 2.3, ainsi que d'inclure un

échange avec les fournisseurs et sous-traitants pour s'assurer de leur accord avec la conception de la chaîne logistique. L'utilisation du BIM peut s'avérer un outil intéressant pour centraliser l'ensemble de ces données et les communiquer convenablement entre toutes les parties. Dans le cas de la construction, et au vu de l'organisation de la première phase d'un projet, les étapes de collecte des besoins du client et de génération et compilation de fonctions du produit seraient dévolues au concepteur (architecte ou ingénierie). L'enjeu de ces phases est en effet déjà présent dans l'étape (1) de la figure 2.3, la mise à jour d'une table d'information avec les fonctions du produit serait alors réalisée au sein du BIM, et permettrait aux entrepreneurs principaux d'y associer les fournisseurs potentiels, les coûts, etc. À partir de ces informations, le cadre peut être repris par l'entrepreneur général pour générer un concept faisable de chaîne logistique, réaliser l'évaluation avec l'indice DfA et la comparaison des modèles issus des deux phases. La proposition issue de ce cadre peut alors être communiquée au concepteur et faire l'objet de discussions, notamment pour être avalisée par le client.

2.5.2 Pistes d'adaptation du modèle de Chiu et Okudan (2011) à la construction

2.5.2.1 « Besoins clients »

Cette étape dans le contexte de la construction est assurée par le concepteur, qu'il soit architecte ou de la partie ingénierie, il est en relation directe avec la maîtrise d'ouvrage Le et al. (2018). L'enjeu est ici d'obtenir de la maîtrise d'ouvrage ses volontés sur le projet, ses attentes, de discuter les implications et ainsi de réduire le risque de mauvaise interprétation. Les résultats de cette phase doivent être communiqués aux entrepreneurs principaux, possiblement grâce au BIM.

2.5.2.2 “Générer les fonctions du produit”

Dans le cadre de l'industrie de la construction, les fonctions du produit seront remplacées par les fonctions que la construction devra remplir. Ces fonctions sont présentées et associées à des caractéristiques permettant de les remplir dans un diagramme fonctionnel EMS (Energy-Material-Signal) qui décrit l'ensemble du fonctionnement du produit. Ce diagramme peut être

utilisé pour un projet de construction. Ces différentes caractéristiques peuvent être également stockées dans le BIM en correspondance avec les besoins exprimés par la maîtrise d'ouvrage auxquels elles répondent.

2.5.2.3 « Maintenir une table d'information sur les composants »

Cette étape consiste pour un projet de construction en la mise à jour du BIM. Elle est cruciale pour assurer une communication efficace entre les différentes parties, notamment sur les attentes de la Maîtrise d'ouvrage, et ainsi permettre la construction d'une chaîne logistique efficace. Cette partie doit donc être réalisée en collaboration étroite entre les parties. Le concepteur fournissant les données clients et les caractéristiques et équipements du projet, tandis que l'entrepreneur principal doit sélectionner et renseigner les fournisseurs potentiels, ainsi que les éléments tels que les coûts, le temps, etc.

Cette étape correspond dans le processus présenté par Le et al. (2018) à l'étape (2) pour laquelle les échanges entre le concepteur et l'entrepreneur général sont intensifiés avec des retours vers le concepteur qui consisteront en la communication du résultat donné par le cadre notamment. Ces échanges permettront d'assurer la cohérence entre les besoins de la maîtrise d'ouvrage, et les contraintes pour une chaîne logistique efficace.

Il en résulte un panel d'options possibles pour assurer les fonctions de la construction finale qui ont été dégagées à partir des demandes du client.

2.5.2.4 « Générer un concept réalisable »

À partir des informations regroupées dans le BIM, le concepteur peut proposer plusieurs concepts d'architectures, pour répondre au mieux aux attentes des clients.

2.5.2.5 « Prioriser les concepts »

Cette étape incombe au contracteur principal. Elle consiste en l'évaluation des différentes solutions proposées à la lumière de critères objectifs préétablis, qui permettront de constituer un indice équivalent au DfA établi par Chiu & Okudan (2011). Il conviendra d'établir précisément les critères qui peuvent être utilisés, en fonction des enjeux que présente le domaine de la construction et des considérations sur les partenaires potentiels. On peut notamment proposer parmi ces critères les éléments suivants :

1. Le degré d'intégration de la chaîne logistique,
2. La coordination entre les acteurs,
3. La gestion et le partage des informations et communication,
4. Le degré de standardisation des éléments de construction,
5. Les délais des fournisseurs,
6. Les prix,
7. Les coûts de transports,
8. La stabilité économique des partenaires.

Les critères seront tous évalués entre 0 et 10, 0 étant la note la plus favorable et 10 la plus défavorable, puis ils seront intégrés à un indice similaire au DfA. De la même manière que dans le modèle de Chiu et Okudan (2011), le concept à la meilleure notation sera retenu dans la phase I. Une fois évalué chaque composant, les concepts d'architecture produits sont modularisés, en utilisant une approche de décomposition (DA).

2.5.2.6 « Phase II »

Le modèle doit faire l'objet d'une adaptation, notamment en ce qui concerne les formulations des contraintes et des coûts, pour pouvoir être appliqué au cadre de la construction. Néanmoins, le principe de minimisation des coûts et la contrainte de réduction du temps de réalisation seront repris dans le modèle appliqué à un projet de construction. C'est ce qui constituera l'objet des chapitres suivants. Cet algorithme permettra de dégager l'architecture de produit la plus adaptée pour la comparer à celle sélectionnée dans la phase I, dans le cadre d'une

application à un éventuel véritable projet. C'est sur cette phase que nous nous pencherons dans la suite de ce mémoire, en essayant dans un premier temps d'adapter le programme à un exemple simple de construction, tout en laissant de côté une partie des enjeux, afin de montrer la possibilité d'une telle démarche. Dans un second temps, nous considérerons des problématiques propres à la construction écartées dans la première étape pour créer un modèle plus pertinent et complet.

CHAPITRE 3

PREMIÈRE VERSION DE MODÈLE : ADAPTATION SIMPLE AU SECTEUR DE LA CONSTRUCTION

L'objectif de ce chapitre est d'utiliser comme base le programme développé dans la phase 2 du modèle de Chiu & Okudan (2011) et d'adapter son fonctionnement à l'industrie de la construction, notamment pour vérifier la faisabilité d'une telle philosophie. Cela implique la prise en compte de contraintes supplémentaires par rapport à l'industrie manufacturière, traduisant par exemple l'importance de la chronologie à respecter dans la fabrication des modules. Pour pouvoir construire ce nouveau programme, il convient d'établir un cas simplifié de projet d'architecture permettant la prise en compte des problématiques évoquées. Par la suite, nous intégrerons la notion de temps de réalisation dans le modèle pour permettre une planification de l'ensemble du projet.

3.1 Choix d'un exemple simplifié d'architecture pour développer le programme

Le choix d'une architecture simple doit permettre de réaliser une première validation du programme et donc d'apporter les corrections nécessaires à son fonctionnement dans le cas particulier du secteur de la construction. Aussi, il convient de choisir une architecture plausible et reflétant les principales problématiques du secteur, en particulier l'importance de la chronologie. Pour cela on utilise les indications présentées par Ching & Adams (2003) pour respecter les normes de base. L'architecture choisie est une construction de quatre poteaux de béton armé, liés entre eux par quatre poutres elles-mêmes en béton armé et supportant une dalle de béton armé, tel que représenté sur la figure 3.1.

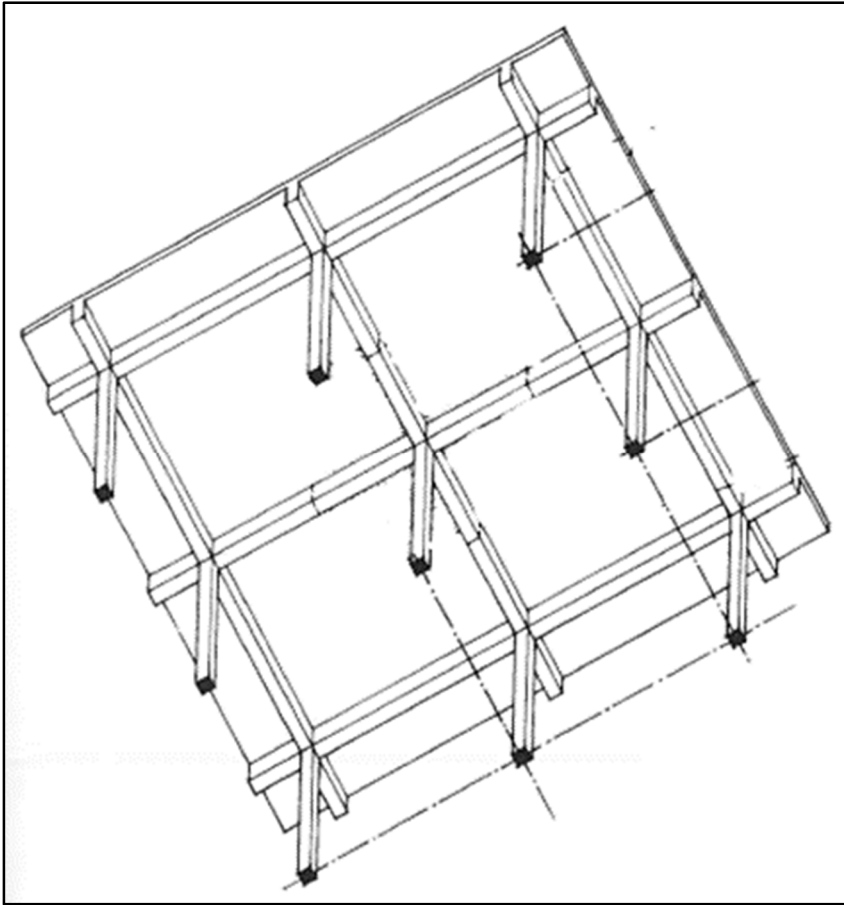


Figure 3.1 Schéma de modèle pour l'armature de béton armé choisie

Tiré de Ching & Adams (2003)

Cette architecture laisse la possibilité de choisir entre plusieurs manières de construire : les poteaux, poutres et dalles pourront être considérées comme réalisées sur place ou en préfabriqués. Par ailleurs on considérera aussi la possibilité de construire les poutres directement incluses à la dalle ou séparément. Ces différentes considérations permettent d'établir une liste de composants de bases à utiliser dans tous les cas pour construire l'architecture. On ignorera, à des fins de simplification, l'inclusion des matières premières dans le programme. Les composants de base considérés seront donc les suivants :

1. Coffrage de bois de poteau,
2. Armature d'acier de poteau,
3. Coffrage de bois de poutre,

4. Armature d'acier de poutre,
5. Coffrage de bois de dalle,
6. Armature d'acier de dalle.

Ces éléments de bases permettent donc la construction des différents sous-modules et modules tels que présentés dans le Tableau 3.1

Tableau 3.1 Nomenclature de l'architecture choisie pour les tests de programme

NOMENCLATURE		
Référence	Elément	Type
ABCDEF	Architecture de béton armé	Produit fini
ABCD	Poutres + Poteaux	Module
CDEF	Dalle + poutres incluses	Module
AB	Poteaux préfabriqués	Sous-module
CD	Poutres préfabriquées	Sous-module
EF	Dalles préfabriquées	Sous-module
A	Armature poteaux en acier	Composant
B	Coffrage poteau en bois	Composant
C	Armature poutres en acier	Composant
D	Coffrage poutre en bois	Composant
E	Armature dalle en acier	Composant
F	Coffrage dalle en bois	Composant

À partir de ces informations, il est désormais possible de mettre en place les outils nécessaires au fonctionnement de base du futur programme, en se basant sur l'exemple des outils utilisés par Chiu & Okudan (2011). On établit donc une matrice de transition, qui servira de base au fonctionnement du modèle, présentée dans le Tableau 3.2. Cette matrice permet de représenter les cheminements possibles de la production des différents éléments de l'architecture. Les colonnes de la matrice représentant les processus permettant cette réalisation tandis que les lignes symbolisent les différents éléments. La présence dans une colonne de la valeur « 1 »

permet de représenter la production de l'élément sur la ligne correspondante par le processus associé à la colonne. Dans la même colonne, on trouve alors dans les lignes inférieures au moins une fois la valeur « -1 » qui permet de figurer la consommation de l'élément de la ligne correspondante au cours du processus associé à la colonne. Ainsi, la matrice de transition permet la lecture des éléments consommés au cours d'un processus qui permet de produire un nouvel élément. Afin de respecter les contraintes du secteur de la construction, et les contraintes physiques du bâtiment, la somme des valeurs sur chaque ligne de la matrice est positive ou nulle (chaque élément consommé peut être produit par un processus) ; et sur chaque colonne la somme des valeurs est négative ou nulle (nomenclature convergente). Par ailleurs, les processus sont numérotés dans l'ordre chronologique inverse en commençant avec les processus donnant le produit final pour les plus petites valeurs.

Tableau 3.2 Matrice de transition de l'exemple d'architecture utilisé pour le modèle

		<i>PROCESSUS</i>														
<i>ETATS</i>		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
<i>FINAL</i>	<i>1</i>	1	1	1												
<i>ABCD</i>	<i>2</i>	-1			1		1									
<i>CDEF</i>	<i>3</i>			-1		1										
<i>AB</i>	<i>4</i>		-1	-1			-1	1								
<i>CD</i>	<i>5</i>		-1				-1		1							
<i>EF</i>	<i>6</i>	-1	-1							1						
<i>A</i>	<i>7</i>				-1			-1			1					
<i>B</i>	<i>8</i>				-1			-1				1				
<i>C</i>	<i>9</i>				-1	-1			-1				1			
<i>D</i>	<i>10</i>				-1	-1			-1					1		
<i>E</i>	<i>11</i>					-1				-1					1	
<i>F</i>	<i>12</i>					-1				-1						1

Le bâtiment peut ici être réalisé de quatre manières différentes, symbolisées dans la matrice par la présence de plusieurs « 1 » sur une même ligne. Ces différentes possibilités sont offertes par la modularisation Benkaddour (2007). Une liste de fournisseurs potentiels est également dressée, lesquels pourront réaliser certains modules ou composants à un certain coût et avec

une certaine durée. À cela s'ajoutent les distances entre les fournisseurs, et entre les fournisseurs et le site de construction. Pour simplifier, les sites sont les mêmes que dans l'article de Chiu & Okudan (2011) et le coût de transport sont recalculés à partir des nouvelles caractéristiques des éléments transportés (taille, volume, poids estimé). On construit donc grâce à toutes les données recueillies une base de données sur tableur qui permet d'importer toutes les informations des paramètres et des constantes dans le programme, et qui récupère également les résultats de l'optimisation. Ce tableur permet en parallèle du programme de calculer les coûts et les temps en fonction des options et fournisseurs choisis, et de les comparer à ceux obtenus dans le solveur pour valider le programme. Le tableur permet en outre une meilleure lisibilité des résultats exportés.

3.2 Rédaction du programme adapté à la construction.

3.2.1 Notations et hypothèses

3.2.1.1 Notations

- Ensembles :

P	Ensemble des processus possibles ;
P _i	Ensemble des processus créant les éléments de base ;
P _j	Ensemble des processus créant les modules ;
P _k	Ensemble des processus créant le bâtiment fini ;
I	Ensemble des fournisseurs de composants de base ;
J	Ensemble des fournisseurs de modules ;
K	Ensemble des fournisseurs du bâtiment fini ;
S	Ensemble des éléments possibles dans la nomenclature.
S _b	Ensemble des éléments de base du bâtiment.

- Variables de décision :

Y(p)	Variable représentant le choix d'un processus, elle vaut 1 si le processus est choisi, 0 sinon ;
------	--

- $X_{p,i}$ Variable représentant le choix d'un fournisseur de composants de base i pour le processus p , vaut 1 s'il est choisi, 0 sinon.
- $X_{p,j}$ Variable représentant le choix d'un fournisseur de module j pour le processus p , vaut 1 s'il est choisi, 0 sinon.
- $X_{p,k}$ Variable représentant le choix d'un fournisseur du bâtiment fini k pour le processus p , vaut 1 s'il est choisi, 0 sinon.

• Paramètres :

T_{sp}	Matrice de transition
C_{pi}	Coût de production pour le processus p par le fournisseur i ;
C_{pj}	Coût unitaire de production pour le processus p par le fournisseur j ;
C_{pk}	Coût unitaire de production pour le processus p par le fournisseur k ;
$TRANC_{pXiXj}$	Coût de transport à l'issu du processus p du fournisseur i vers j ;
$TRANC_{pXjXk}$	Coût de transport à l'issu du processus p du fournisseur j vers k ;
$TRANC_{pXjXj'}$	Coût de transport à l'issu du processus p du fournisseur j vers j' ;
$TRANT_{XiXj}$	Temps de transport du fournisseur i vers j ;
$TRANT_{XjXk}$	Temps de transport du fournisseur j vers k ;
$TRANT_{XjXj'}$	Temps de transport du fournisseur j vers j' ;
$N_{pp'ij}$	Matrice d'enchaînement entre les processus : indique si p' est réalisable par j après la réalisation de p par i ;
$N_{pp'jk}$	Matrice d'enchaînement entre les processus : indique si p' est réalisable par k après la réalisation de p par j ;
$N_{pp'jj'}$	Matrice d'enchaînement entre les processus : indique si p' est réalisable par j' après la réalisation de p par j ;
L_{pi}	Durée de réalisation du processus p chez le fournisseur i ;
L_{pj}	Durée de réalisation du processus p chez le fournisseur j ;
L_{pk}	Durée de réalisation du processus p chez le fournisseur k ;
$Selec(s, p)$	Matrice indiquant que le processus p est sélectionné pour réaliser l'élément s ;

Calendrier (p, t)	Matrice indiquant les processus actifs à la période t , le temps de transport à la suite d'un processus p est compté dans la ligne du processus p , qui prend alors la valeur arbitraire 100 pour chaque période où les éléments sont en transport ;
Enchaînement (s, x)	Matrice retraçant les différentes branches de la nomenclature à partir des composants de base, jusqu'au bâtiment fini, x représentant la longueur maximale des branches de la nomenclature (celle ayant le plus d'étapes).

3.2.1.2 Hypothèses du modèle

Une série d'hypothèses est posée dans le but de simplifier le problème pour ce premier modèle.

Ces hypothèses sont les suivantes :

1. Tous les fournisseurs sont capables de faire les activités prévues au moment voulu ;
2. Pas de rupture de stock ;
3. Les quantités ne sont pas prises en compte ;
4. Hypothèse de construction de la matrice de transition :
5. Un seul fournisseur est choisi pour réaliser un processus ;
6. Un processus ne peut avoir qu'un seul processus successeur actif ;
7. Un processus p ne produit qu'un seul élément s .

3.2.2 Définition des contraintes pour le modèle adapté

Après avoir établi les données nécessaires au fonctionnement du programme avec la nouvelle architecture, il faut maintenant modifier le programme pour lui faire prendre en compte les contraintes spécifiques de la construction et permettre une planification des tâches. L'optimiseur utilisé est le logiciel Xpress IVE Version 1.24.26 de FICO®. La fonction-objectif portant sur la minimisation des coûts est, dans un premier temps, considérée comme identique au programme original. Celle-ci étant quadratique et non linéaire, le module non linéaire de l'optimiseur, « mmnl », est utilisé en plus du module classique « mmxprs ».

Les contraintes de Chiu & Okudan (2011) présentent quelques problèmes et doivent être modifiées pour pouvoir faire fonctionner le programme. C'est notamment le cas des contraintes (A I-2), (A I-7), (A I-8) et (A I-11), présentées en Annexe I. La première est remplacée par la contrainte présentée par l'équation (3.1) qui permet d'imposer au solveur le choix d'une forme d'architecture à réaliser parmi celles possibles. La contrainte (A I-1) ne permettait en effet que de garantir la coexistence des intrants et sortants, mais laissait au solveur la possibilité de ne choisir aucun processus ni fournisseur, et donc renvoyer un coût total nul et aucune sélection réalisée. La modification de contrainte permet de s'assurer qu'un choix est bien réalisé. De plus la contrainte (A II-2) agissait sur les données paramétriques et donc était inutile.

$$\sum_{p \in P} T_{sp}(1, p) \times Y(p) = 1 \quad (3.1)$$

D'autre part, le programme de Chiu & Okudan (2011) souhaitait réaliser l'optimisation simultanée des coûts et du temps de réalisation. Chose qui n'a pas pu être réalisée, car l'optimiseur ne supporte qu'une fonction-objectif à la fois dans le programme. Le calcul du temps de réalisation est donc choisi comme résultant des décisions prises pour l'optimisation des coûts, d'où la suppression des contraintes (A I-7) et (A I-8) et (A I-11) qui deviennent inutiles. Par ailleurs, pour assurer la correspondance entre $Y(p)$ et les X_{pi} , X_{pj} , X_{pk} , les contraintes (A I-3), (A I-4) et (A I-5) sont modifiées pour donner les contraintes formulées par les équations (3.2), (3.3) et (3.4). Elles permettent également d'assurer qu'un seul fournisseur uniquement soit choisi parmi les compétents pour réaliser un processus p . Toutes les autres contraintes sont maintenues telles quelles.

$$\sum_{i \in I} X_{pi} = Y(p) \quad \forall p \in [10, 15] \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in J} X_{pj} = Y(p) \quad \forall p \in [4, 9] \quad (3.3)$$

$$\sum_{k \in K} X_{pk} = Y(p) \quad \forall p \in [1, 3] \quad (3.4)$$

3.2.3 Inclusion du calcul du temps de réalisation et coûts des transports

Nous avons vu précédemment que la méthode de Chiu & Okudan (2011) pour calculer le temps de réalisation ne fonctionne pas dans le solveur utilisé ici. Il nous faut donc déterminer une façon différente de calculer le temps de réalisation de la solution qui est obtenue après optimisation. Nous nous contentons en effet dans un premier temps de déduire le temps de réalisation de la solution sans en influencer la valeur. Pour cela il faut introduire de nouvelles matrices permettant de lier les différentes étapes choisies dans le déroulement du processus de construction. L'optimiseur ne renvoie en effet que les références des étapes choisies, avec la garantie que les enchaînements peuvent se réaliser, mais aucune information n'est en revanche communiquée sur les processus antécédents et successeurs. Il faut donc pouvoir retrouver cette information pour calculer le temps de réalisation, mais également les coûts de transports entre deux processus.

Pour cela trois nouvelles matrices sont créées à partir de la matrice de transition pour lier processus pouvant se succéder, en prenant en compte les fournisseurs pouvant réaliser les processus. Elles indiquent pour chaque processus en cours les antécédents possibles et les fournisseurs liés à chacun des deux processus. Ce sont les matrices :

1. Npp'_{ij} , pour les successions entre processus créant les composants et ceux créant les sous-modules ;
2. Npp'_{jk} , pour les successions entre processus créant les sous-modules et ceux créant les modules ;
3. $Npp'_{jj'}$, pour les successions entre plusieurs processus créant les sous-modules.

Les informations de successions des processus contenues dans ces matrices, conjuguées à l'utilisation des variables de décision X_{pi} , X_{pj} , et X_{pk} permettent donc la liaison entre les différentes étapes de la réalisation de l'architecture, à la manière d'une arborescence. Ces données sont donc précieuses, car elles vont permettre de calculer la durée de chacune des branches de cette arborescence et ainsi déterminer le temps de réalisation du projet. Le calcul du coût de transport entre deux processus est alors estimé par l'équation (3.5), tandis que le

temps de réalisation est obtenu par l'équation (3.6). Chaque durée de réalisation comporte une composante aléatoire qui permet une prise en compte des aléas de production des éléments et de réalisation des processus.

$$\begin{aligned}
& \sum_{p \in [4, 9], pp \in [10, 15], i \in I, j \in J} \left(TRANCXiXj(pp, i, j) \times N_{pp'ij}(p, pp, i, j) \right. \\
& \quad \times X_{pi}(pp, i) \times X_{pj}(p, j) \Big) \\
& + \sum_{p \in [1, 3], pp \in [4, 9], j \in J, k \in K} (TRANCXjXk(pp, j, k) \\
& \quad \times N_{pp'jk}(p, pp, j, k) \times X_{pj}(pp, j) \times X_{pk}(p, k)) \\
& + \sum_{p = 6, pp \in [7, 8], j \in J, jj \in J} (TRANCXjXj(pp, j, jj) \\
& \quad \times N_{pp'jj'}(p, pp, j, jj) \times X_{pj}(pp, j) \times X_{pj}(p, jj)) \\
& \max_{i \in I, j \in J, k \in K, p \in [1, 3], q \in [4, 9], r \in [10, 15]} [L_{pi}(r, i) + TRANTXiXj(i, j) \\
& \quad + L_{pj}(q, j) + TRANTXjXk(j, k) \\
& \quad + L_{pk}(p, k)] \times N_{pp'ij}(q, r, i, j) \times N_{pp'jk}(p, q, j, k) \\
& \quad \times X_{pi}(r, i) \times X_{pj}(q, j) \times X_{pk}(p, k)
\end{aligned} \tag{3.6}$$

La prochaine étape consiste alors à déterminer, en plus du temps de réalisation du projet, le chemin critique pour pouvoir effectuer une première planification sommaire ; sur laquelle on se basera par la suite pour développer la planification finale du projet.

3.2.4 Élaboration d'une planification simple

La planification simple consiste à établir le déroulement au jour le jour du chemin critique. Pour ce faire nous créons une matrice dynamique à deux dimensions : *Enchainement* (s, x). La première dimension s est déterminée par le nombre de branches dans la nomenclature, que nous considérons comme égal au nombre de composants de base dans la nomenclature. La seconde dimension dépend du nombre d'étapes présentes dans la plus « longue » des branches de l'arborescence. Pour chaque étape d'une branche, il faut prendre en compte le numéro de

processus, le temps que dure le processus, et le temps de transport du processus précédent à l'actuel. On ajoute pour chaque branche le temps total que prennent les processus et transports ; de sorte que la dimension x équivaudra à *(la « longueur » de la branche) *3+1*. De cette manière, la matrice *Enchainement* liste le détail des informations nécessaires pour la planification de chaque processus et de chaque transport.

Il est nécessaire dans un premier temps de déterminer la taille de la branche la plus longue afin de déterminer la valeur de x maximale. Pour cela nous parcourons chacune des branches de l'arborescence en commençant par les composants basiques et en comptant chaque processus présent dessus. Cette opération est menée grâce au code présenté dans l'Algorithme 4.1.

Algorithme 4.1 Comptage de la longueur des branches avec détermination de la longueur maximale

Nomenclature branches size counting

Input Array of real Selec, empty array of integer comptage, real compteur

Output Array of integer comptage with the length of each branch of the nomenclature

```

1  Initialize comptage =  $\emptyset$  and compteur = 0;
2  Forall i in [1, 3], p in [10, 15], s in [7, 12] such as Selec (s, p) = 1 and
   Selec (1, i) = 1:
3      comptage (p) = 1;
4      compteur = 1;
5      y = s, x = p, q = i;
6      While x>q:
7          Forall r in [1, 9] such as Selec (y, r) + Selec (y, x) = 0:
8              comptage (p) += 1;
9              x = r;
10             Forall t in [1, 12] such as Selec (t, x) = 1:
11                 y = t;
12             End-forall;
13         End-forall;
14     End-While;
15     If comptage (p) > compteur:
16         compteur = comptage (p);
17     End-if;
18 End-forall;

```

Ce calcul permet ensuite de continuer en construisant la matrice *Enchainement* telle que décrite précédemment pour chacune des branches. Cette construction se fait au sein d'une procédure, nommée *Arborescence* qui vise à déterminer toutes les informations contenues dans *Enchainement* directement à partir de l'extraction des données. Cela se fait au sein d'une procédure particulière afin de pouvoir définir les éléments nécessaires à sa construction, en utilisant directement les résultats de l'optimisation des coûts. Il est donc plus facile d'automatiser la construction de la matrice. Toutefois, les éléments définis dans la procédure ne sont que temporaires et valables dans la procédure, c'est pourquoi il faut utiliser une seconde matrice construite sur mesure : *Arbre* (s, x) où les dimensions s et x sont celles correspondantes à celle de la matrice *Enchainement*. L'algorithme de la procédure est présenté en Annexe II. Une fois cette dernière construite, il faut trouver le chemin critique ainsi que le temps de réalisation du projet de construction, et ce grâce à la comparaison des derniers éléments de chaque ligne de la matrice *Enchainement*. Dès lors la planification du chemin critique est possible.

La planification est établie grâce à une matrice nommée *Calendrier* construite directement à partir des informations de l'optimisation et dont les paramètres seront le nombre de processus total P , et le délai prévu pour le projet, estimé en arrondissant à l'entier supérieur la valeur du temps de réalisation déterminé par le programme. Cette matrice accueillera les nombres identifiant chaque processus, chaque élément de la matrice représentant une activité (correspondant à la ligne) réalisée à un jour précis (correspondant à la colonne). Une activité durant n jours est donc identifiée dans n cases de la même ligne, cette dernière correspondante à l'identifiant de l'activité. Arbitrairement l'activité de transport est représentée par la valeur 100. Il est pris comme hypothèse dans un premier temps que lorsqu'une activité se termine au jour j , l'activité suivante débute le jour $j+1$ et ce même si la journée j n'est pas pleine. Par ailleurs, on considère que la mise en place sur le site est comprise dans le délai de livraison, pour des raisons de simplification. La première ligne de la matrice est choisie pour représenter le déroulement du chemin critique. Les autres chemins seront élaborés en parallèle, suivant les spécifications de priorité.

3.2.5 Insertion de contraintes de préséance dans la réalisation des processus

Dans le secteur de la construction, il est parfois nécessaire que certains processus soient réalisés en amont de certains autres, notamment à cause de contraintes physiques évidentes ou encore pour éviter l'encombrement du chantier avec un stock excessif de composants. Dans un souci de fiabilité et de réalisme du modèle, il est donc nécessaire de prendre en compte ces contraintes de préséance pour certains éléments.

L'utilisation de la matrice de transition permet de prendre en compte uniquement les besoins en éléments pour construire tel composant, tel module ou tel produit. Elle ne permet pas en revanche de prioriser ces besoins, car l'ordre n'est pas forcément nécessaire pour des produits tels que les vélos présentés dans l'article de Chiu & Okudan (2011). Il est donc nécessaire d'ajouter un élément pour introduire cette priorisation. Deux possibilités peuvent être envisagées : l'ajout pour chaque processus d'une notation sur les éléments nécessaires, pour déterminer lesquels doivent arriver en premier ou dans un second temps, en est une. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite d'avoir une quantité d'information importante sur chacun des processus, et donc alourdit la masse de données à traiter. De plus, elle risque de compliquer l'utilisation de la matrice de transition, car sa forme ne peut pas en être proche et nécessitera des interventions supplémentaires pour lier les deux.

Nous choisissons donc d'utiliser une matrice regroupant ces informations de préséance obligatoire, en se basant sur la matrice de transition. Celle-ci devra être renseignée simultanément avec les autres données du problème pour pouvoir faire fonctionner le programme, en se basant sur les informations fournies par la conception. L'exemple utilisé dans notre cas est présenté dans le Tableau 3.3.

Cette matrice, à la différence de la matrice de transition, ne prend en compte que les processus. La forme similaire à la matrice de transition sur laquelle se base le programme permet cependant une intégration plus simple des informations ainsi transmises. Chaque cellule où apparaît un 1 signifie que le processus de la colonne correspondante est le processus antécédent qui doit être achevé en premier pour débiter le processus de la ligne correspondante. Si la cellule présente un nombre n compris dans l'intervalle $]0 ; 1[$, alors l'activité en colonne doit être achevée et livrée sur le site de l'activité de la ligne lorsque le temps écoulé pour cette dernière est égal à $n \cdot (\text{temps de l'activité de la ligne})$. Cette matrice doit permettre d'établir une note de priorité pour les différentes branches de l'arborescence établie par le programme. Lors du processus de planification, la note de priorité de chacune des branches permet de choisir l'ordre de planification pour adapter les échéances aux besoins du chantier. L'ajout de ce décalage grâce à la matrice de priorité permet donc d'échelonner les arrivées des différents produits sur le site et chez les fournisseurs, ouvrant ainsi la porte à l'introduction de la gestion de stocks dans la conception de la chaîne logistique.

Tableau 3.3 Matrice de priorité des processus

[illegible]

3.3 Discussion des résultats du modèle

L'utilisation de ce modèle adapté de Chiu et Okudan (2011) permet de déterminer pour l'exemple simplifié d'architecture choisi une chaîne logistique, dont le coût est minimisé, et de créer ensuite une planification élémentaire des tâches. Le modèle est résolu par le solveur Fico® Xpress Optimizer en 0,1 seconde avec 356 contraintes et 159 variables. Les résultats présentent toutefois certaines limites que nous nous proposons ici d'évaluer pour proposer des pistes en vue d'une version bêta répondant à ces nouvelles problématiques.

3.3.1 Interprétation des résultats et validation du modèle

Le test du programme avec les valeurs de la publication de Chiu & Okudan (2011) permet de retrouver les mêmes résultats, aux variations dues aux composantes aléatoires près. Cela nous permet donc de considérer le modèle recréé comme fiable, nous permettant de l'exploiter avec des données adaptées à la construction. Le programme donne en premier lieu un choix pour les processus permettant de réaliser l'architecture. Ce choix des processus est représenté par la variable de décision $Y(p)$ qui prend la valeur « 1 » lorsque le processus p est sélectionné, et est nulle sinon. Une deuxième variable de décision X_{pi} associe à chaque processus p sélectionné un fournisseur i parmi ceux compétents. Le choix des processus et des fournisseurs est directement conditionné par les coûts de fabrication d'un processus chez un fournisseur, les coûts de stockage et les coûts de transports. Nous obtenons les valeurs présentées dans le Tableau 2.4 grâce aux données choisies.

Tableau 3.4 Processus et fournisseurs sélectionnés pour la réalisation du bâtiment

<i>P</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
<i>Y(p)</i>		1					1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>I</i>		1					5	7	6	6	8	9	4	2	12

Ces éléments correspondent à la réalisation d'une nomenclature représentée sous la forme d'une arborescence dans la figure 3.2.

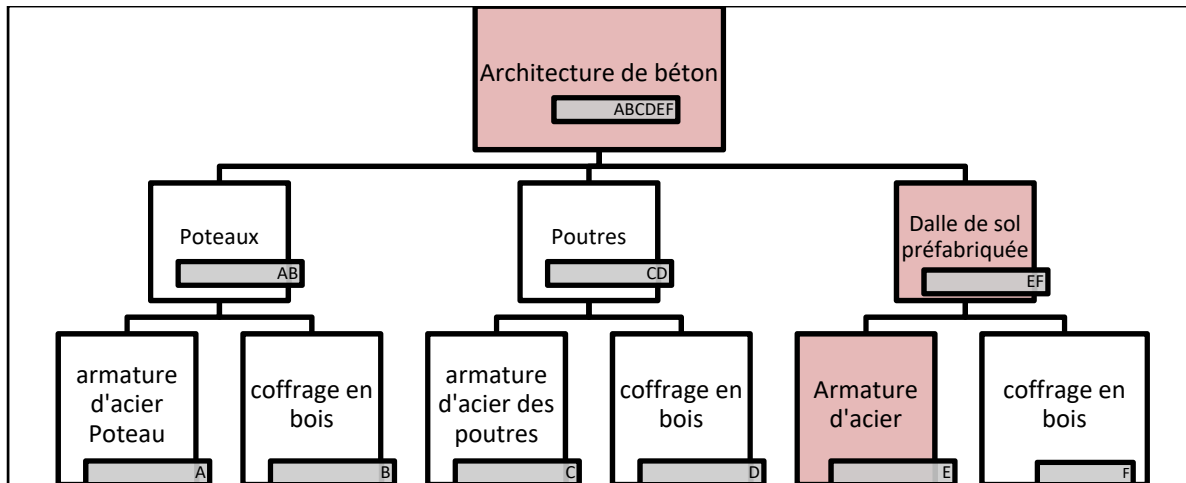


Figure 3.2 Architecture choisie après optimisation, avec chemin critique (rouge)

Le programme permet également d'estimer les coûts relatifs à la réalisation de l'option choisie, comportant réalisation, transports et stockage, en fonction des données de tarifications entrées dans la base de données du tableur. Notre exemple étant fictif, aucune devise spécifique n'a été imposée, nous raisonnons en termes de dollars US (\$). Le coût total est estimé ici par le programme à 3106 \$. L'ensemble des données sélectionnées permet de vérifier que le modèle fonctionne correctement : aucun des fournisseurs choisis ne réalise de tâches pour lesquelles il n'est pas compétent, les enchaînements de processus sont cohérents, et enfin les calculs de coûts, refaits indépendamment du programme, sont justes. Par ailleurs, on observe en modifiant les valeurs des données d'entrée du programme (coûts des fournisseurs, coûts de transports, compétences des fournisseurs, etc.) que celui-ci réagit et adapte la réponse apportée. On obtient alors des répartitions différentes, voire des architectures variées (utilisation des processus 1 ou 3), tout en conservant la cohérence de la réponse.

Après l'optimisation en termes de coûts vient le protocole de planification élémentaire des choix réalisés. Le programme identifie alors les différents enchaînements de processus, en partant des processus réalisant les composants de bases (numérotés de 10 à 15), de sorte qu'il peut reconstituer les « branches » de l'arborescence présentée en figure 3.2. Les données du programme permettent alors, en connaissant les temps d'exécution de chaque processus et les temps de transport d'un fournisseur à l'autre, de déterminer les durées effectives de réalisation

de chacune des branches, en prenant en compte dans le calcul les échelonnements dans le temps des activités et des arrivées de livraisons grâce à la matrice de priorité des processus présentée dans le Tableau 3.3. La comparaison de ces durées permet au programme de mettre en évidence le chemin critique du projet de construction et d'en déduire le temps de réalisation. En l'occurrence, le chemin critique est ici la succession des processus 14, 9 et 2, repéré en rouge sur la figure 3.2. Le programme répartit alors le chemin critique sur un calendrier (matrice) et agence ensuite les autres activités afin que les livraisons correspondent aux moments exigés pour la réalisation du chemin critique, en prenant en compte les échelonnages des arrivées sur sites. On obtient alors le graphique représenté en figure 3.3 qui représente la répartition des activités dans le temps en prenant en compte les transports. Nous pouvons observer sur ce graphique que les activités 14, 9 et 2 ainsi que les temps de transports qui y sont associés occupent toute la durée du projet, confirmant ainsi qu'il s'agit du chemin critique. Nous pouvons également constater l'échelonnement des livraisons puisque les représentations des temps de transports s'achèvent dans certains cas lorsqu'un processus suivant est déjà entamé.

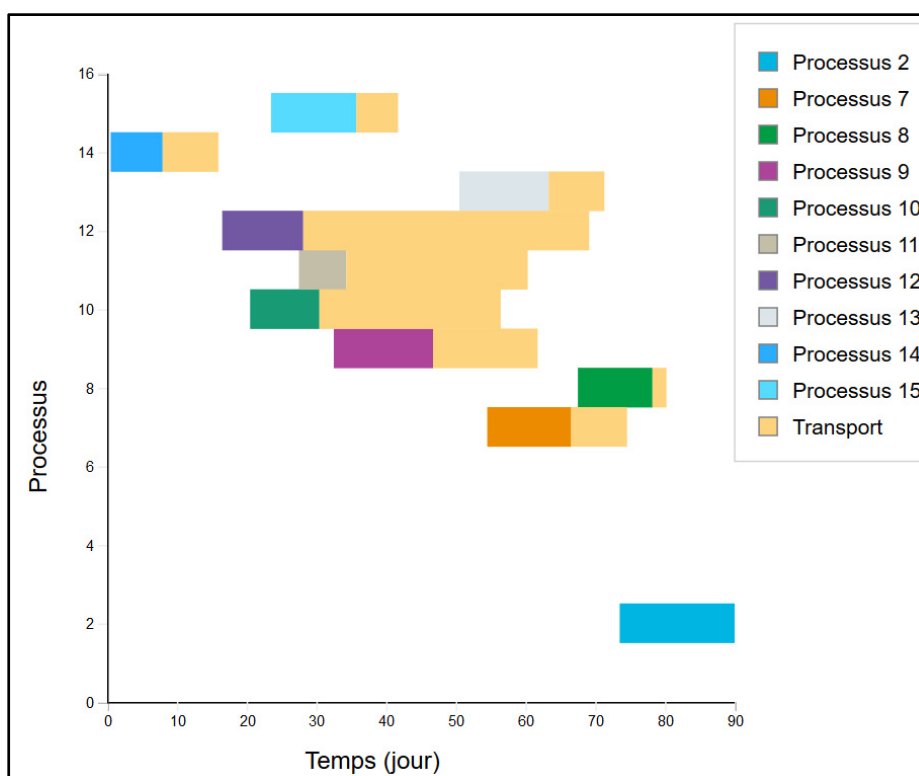


Figure 3.3 Planification des tâches et transports

Ici encore, la modification des données d'entrée du problème entraîne une réaction sur la planification, qui suit les nouveaux processus éventuels et adapte les transports, temps de processus et durée du projet en fonction des résultats de l'optimisation. Par ailleurs, l'introduction d'une composante aléatoire dans les durées des processus se reflète également sur le projet : la durée totale et la planification varient d'une expérience à l'autre. Toutefois, l'ensemble des expériences montre une certaine cohérence, puisque les différents temps de réalisations obtenus sur une série de 50 essais ont une valeur moyenne de 87,9 jours avec un écart type de 1,41 jours sur l'ensemble des valeurs.

Les résultats dégagés ici grâce à ce modèle nous permettent de valider le principe d'adaptation d'un programme de l'industrie manufacturière au contexte de l'industrie de la construction. Il s'agit donc d'une base sur laquelle nous allons désormais travailler pour étoffer le modèle nouveau, et lui permettre de répondre aux problématiques identifiées, mais non prises en compte dans cette phase.

3.3.2 Limitations intrinsèques au modèle

Le modèle développé précédemment comporte des limitations vis-à-vis des problématiques du secteur de la construction liées à sa conception même. Il est en effet adapté directement d'un modèle prévu pour une production industrielle de vélo, donc élude les aspects spécifiques d'un bâtiment. En premier lieu, il faut souligner que chaque élément du bâtiment n'est produit qu'une fois, ce qui correspondait à la nomenclature du vélo chez Chiu et Okudan (2011). Or pour un bâtiment, il est nécessaire de prendre en compte que certains éléments seront redondants, l'architecture se basant sur des éléments simples et répétés pour produire un bâtiment plus ou moins complexe. Le modèle dans une seconde version devra donc traduire le besoin d'utiliser plusieurs éléments redondants dans le déroulement d'un processus.

Par ailleurs, la construction d'un bâtiment nécessite d'instaurer un ordre de réalisation spécifique, correspondant aux impératifs physiques autant que pratiques du bâtiment. Or le modèle originel ne faisait pas face à cette problématique au sein de l'optimisation, et ne prenait

donc pas en compte un ordre de priorité dans l'accomplissement des tâches, en dehors des éléments nécessaires à la réalisation d'un module (le pédalier pouvant par exemple être fixé sur le cadre avant le guidon et vice versa). Cette carence est un obstacle à la fidélité du modèle vis-à-vis de la réalité de la construction d'un bâtiment, que nous avons contourné dans l'adaptation grâce à la matrice du Tableau 3.3.

L'introduction de ces deux problématiques dans un nouveau modèle conduit à une troisième concernant la gestion des stocks sur site. La logistique sur le site est en effet un enjeu fondamental du secteur comme le rappelle le projet CIVIC (2018). L'encombrement du site, en particulier en milieu urbain, où l'espace disponible est plus restreint, est source de ralentissements du projet, de casses, et donc de surcoûts. La gestion des livraisons en fonction de l'espace de stockage disponible sur le site devra donc permettre d'éviter ces écueils, la gestion de la production des éléments et de leurs livraisons devra donc prendre en compte ces contraintes spécifiques.

3.3.3 Pistes de développement pour la seconde version

Afin de répondre aux différentes limites repérées dans le modèle établi, un second modèle, plus complet, est réalisé. Il s'agit, en s'appuyant sur le travail déjà accompli, d'inclure l'aspect des quantités d'éléments dans l'architecture. Pour cela, l'architecture initiale est donc affinée, et de nouvelles hypothèses doivent être formulées. Les différentes possibilités d'architectures étant d'avance connues, les quantités d'éléments à produire sont également préétablies.

Par ailleurs, afin de prendre en compte l'aspect temporel en même temps que les coûts de production, nous introduisons une variable temporelle pour désigner si le processus sera actif à la période t chez tel fournisseur. Un coût journalier d'utilisation du processus permet la prise en compte des délais dans l'optimisation.

Il s'agit alors de déterminer quelles sont les quantités à produire, à expédier sur quelle période, en prenant en compte l'impact sur les coûts de réalisation du projet. Diverses options peuvent

être alors envisagées, comme la limitation de la taille des stocks, la modification des tailles de lots à livrer ou encore une incitation financière à la réduction des délais du projet.

CHAPITRE 4

SECONDE VERSION DE MODÈLE : MODÈLE COMPLET

Après la réalisation d'un modèle d'optimisation simple ne prenant en compte que les coûts de production et de transport, visant à nous assurer de la faisabilité de notre démarche, nous choisissons d'en effectuer une deuxième version qui inclura d'autres aspects des problématiques de la construction. Nous prenons ainsi en compte la gestion des stockages sur site de construction et l'ajout d'un « *crashing cost* » pour aider la prise de décision quant au temps de réalisation du projet. Nous remarquons en effet qu'une simple optimisation selon les coûts peut éventuellement s'avérer coûteuse en termes de temps de réalisation, pour un gain financier relativement faible. L'objectif de cette deuxième version est donc de procurer des informations supplémentaires au contracteur général du projet, afin d'offrir une meilleure vision pour la prise de décision. Cette seconde version nécessite donc pour remplir ses objectifs de modifier profondément la rédaction du programme, toutefois nous gardons le principe de base utilisant la matrice de transition pour représenter le cheminement des différents processus possibles pour la réalisation du projet.

4.1 Modification de la philosophie du modèle

Le précédent modèle nous a permis la conception d'une chaîne logistique optimisant les coûts de production des éléments et de réalisation du bâtiment, ainsi que les coûts de transport d'un site à l'autre, jusqu'au site de construction. Toutefois, la problématique soulevée plus haut de gestion des stocks pour éviter l'encombrement du site de construction n'est pas prise en compte dans ce modèle. Le premier aspect modifié dans cette nouvelle version consiste à introduire la notion de quantités consommée et produite pour chaque processus. Cette donnée supplémentaire pousse à modifier également l'interprétation des autres données : les coûts de production et de transports seront désormais considérés comme des coûts unitaires, ainsi que le temps de production.

L'architecture étant considérée comme prédéterminée par le bureau d'ingénierie, nous pouvons considérer que les quantités de produits nécessaires dans l'ensemble du processus de construction sont définies à l'avance. Ces quantités sont donc présentées dans le Tableau 4.1, elles permettent de se rapprocher de la réalité physique des besoins pour le bâtiment.

Tableau 4.1 Nomenclature du bâtiment modèle avec quantités

<i>NOMENCLATURE</i>			
<i>Référence</i>	<i>Elément</i>	<i>Type</i>	<i>Quantités</i>
ABCDEF	Architecture de béton armé	Produit fini	1
ABCD	Poutres + Poteaux	Module	1
CDEF	Dalle + poutres incluses	Module	1
AB	Poteaux préfabriqués	Sous-module	4
CD	Poutres préfabriquées	Sous-module	4
EF	Dalles préfabriquées	Sous-module	10
A	Armature poteaux en acier	Composant	12
B	Coffrage poteau en bois	Composant	12
C	Armature poutres en acier	Composant	12
D	Coffrage poutre en bois	Composant	12
E	Armature dalle en acier	Composant	10
F	Coffrage dalle en bois	Composant	10

Par ailleurs, nous maintenons l'hypothèse que seul un processus peut être choisi pour réaliser un produit s donné. Le modèle se basera toujours sur la matrice de transition, qui est modifiée de sorte à introduire les quantités d'éléments antécédents consommés par la réalisation de chacun des processus. Elle présente ainsi des valeurs négatives différentes de 1, signifiant que x produits s sont consommés. La nouvelle matrice correspond donc à ce qui est présenté dans le Tableau 3.2.

L'ensemble du nouveau programme sera basé sur la matrice de transition pour prendre en compte simultanément les consommations et les productions sur un site donné lors d'un processus. Une matrice de variables *Enchaînement* est mise en place, qui représentera l'action d'un processus p actif chez un fournisseur i à la période t ; pour chaque triplet (p, i, t) on aura un vecteur de taille 12 correspondant à la valeur produite ou consommée de chacun des

éléments possibles. Schématiquement, cette matrice correspondra donc à la matrice de transition, répétée et actualisée pour chaque fournisseur et période.

Tableau 4.2 Matrice de transition adaptée aux quantités

		<i>PROCESSUS</i>														
<i>ETATS</i>		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
<i>FINAL</i>	<i>1</i>	1	1	1												
<i>ABCD</i>	<i>2</i>	-1			1		1									
<i>CDEF</i>	<i>3</i>			-1		1										
<i>AB</i>	<i>4</i>		-4	-4			-4	1								
<i>CD</i>	<i>5</i>		-4				-4		1							
<i>EF</i>	<i>6</i>	-10	-10							1						
<i>A</i>	<i>7</i>				-12			-3			1					
<i>B</i>	<i>8</i>				-12			-3				1				
<i>C</i>	<i>9</i>				-12	-12			-3				1			
<i>D</i>	<i>10</i>				-12	-12			-3					1		
<i>E</i>	<i>11</i>					-10				-1					1	
<i>F</i>	<i>12</i>					-10				-1						1

Pour assurer la gestion des stocks, un paramètre temporel est introduit sur les variables de décision. Ce nouvel aspect temporel doit permettre d'assurer à chaque instant que les stocks chez un fournisseur ou sur le site de construction ne dépasseront pas la place disponible. En outre, il s'agit de pouvoir planifier directement les processus, simultanément à l'optimisation des coûts. Une variable de décision supplémentaire, représentant les expéditions d'un élément s réalisées à la date t d'un fournisseur donné vers un autre, est enfin introduite dans le modèle.

4.2 Formulation mathématique de la seconde version

4.2.1 Nouvelles notations

Pour répondre aux nouvelles problématiques, de nouveaux paramètres sont ajoutés, des variables sont modifiées, et d'autres sont supprimées. Les nouvelles notations utilisées dans cette version sont les suivantes :

4.2.1.1 Ensembles

Smob	Ensemble des éléments transportables ;
Succ (s)	Table des fournisseurs utilisant le produit s ;
Fourn(p)	Ensemble des fournisseurs potentiels pour le processus p ;
FS(s)	Ensemble des fournisseurs potentiels pour le produit s ;
P	Ensemble des processus possibles ;
I	Ensemble des fournisseurs.

4.2.1.2 Variables de décision

Y (p)	Variable représentant le choix d'un processus, elle vaut 1 si le processus est choisi, 0 sinon ;
X (p, i, t)	Variable représentant le choix d'un fournisseur i pour le processus p à la période t , vaut 1 s'il est choisi, 0 sinon ;
E (s, i, j, t)	Variable de décision représentant l'envoi d'un lot d'élément s du fournisseur i vers le fournisseur j à la période t , vaut 1 s'il a lieu, 0 sinon ;
Entrepot (i, t)	Volume occupé chez un fournisseur.

4.2.1.3 Paramètres et variables

Délais	Délais maximal du projet ;
TpsTranspMAX	Temps de transport maximal d'un site à l'autre ;
TpsTranspMIN	Temps de transport minimal d'un site à l'autre ;
Tsp	Matrice de transition
Cpi	Coût unitaire de production pour le processus p par le fournisseur i ;
Cstocks	Coût unitaire des stocks par période chez un fournisseur ;
Besoin (p, s)	Quantité de produit s pour la réalisation d'une unité par le processus p ;

Lot (s)	Taille des lots de produit s pour le transport ;
Qprod (p)	Quantités à réaliser par un processus ;
Qtot (s)	Quantités totales des éléments à produire ;
Stock (i, t, s)	Taille des stocks de produit s chez le fournisseur i à la période t ;
Transit (s, t)	Quantité d'éléments s transitant à la date t ;
Productivité (i, p)	Productivité par période d'un fournisseur i dans le cas du processus p ;
Enchainement (p, i, t, s)	Matrice de variables représentant les quantités de s produites ou consommées à chaque période t pour chaque processus p chez chaque fournisseur i ;
$R(s, i, t)$	Variable de décision représentant la réception d'un lot d'élément s chez le fournisseur i à la période t ;
Espace (i)	Espace de stockage disponible chez le fournisseur i ;
Surcout	Surcoût pour les périodes d'activité après la date butoir ;
DateObj	Date butoir visée pour la réalisation du projet.

4.2.2 Hypothèses de travail

Afin de simplifier le modèle tout en prenant en compte les problématiques essentielles du secteur de la construction, une série d'hypothèses est posée pour cette seconde version. Elles reprennent en partie les hypothèses présentées dans la première version de modèle, et les complètent pour pouvoir faire face aux problématiques introduites par la périodisation et l'ajout des stocks. Les nouvelles hypothèses sont donc :

1. Tous les fournisseurs sont capables de faire les activités prévues au moment voulu ;
2. Un processus ne peut avoir qu'un seul processus successeur actif ;
3. Un processus p ne produit qu'un seul élément s .
4. Les éléments mobiles doivent être produits par un autre acteur que l'entrepreneur principal du projet ;

5. Les matières premières des processus sont disponibles en tout temps dans les bonnes quantités ;
6. On ne produit pas de surplus par rapport aux quantités requises ;
7. Tous les moyens de transport requis le sont au moment voulu ;
8. Les éléments sont transportés par lots dont les tailles sont fixées préalablement.

4.2.3 Formulation mathématique

La rédaction du modèle mathématique reprend le principe de base du modèle qui avait été développé par Chiu & Okudan (2011). Toutefois, afin d'introduire le concept de périodisation de la variable de décision $X_{p,i,t}$, ainsi que pour la gestion des stocks, nous nous inspirons également des travaux menés par Comelli (2008) et par Benkaddour (2007). La fonction-objectif est également quelque peu modifiée, notamment en ce qui concerne les coûts de stockages, qui ne sont plus considérés comme une combinaison linéaire des coûts de processus et de transports, mais estimés directement en fonction d'un coût unitaire de stockage chez chaque fournisseur et pour chaque élément mobile. L'introduction d'un paramètre de temps permet de prendre en compte le temps de stockage et d'obtenir ainsi un coût réel de stockage, ce que nous ne pouvions faire dans le premier modèle.

4.2.3.1 Fonction-objectif

$$C_1 = \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} [C_{p,i} \times X_{p,i,t}] \quad (4.1)$$

$$C_2 = \sum_{s \in S_{mob}} \sum_{i \in I, j \in I} \sum_{t \in T} E(s, i, j, t) \times Lot(s) \times TRANCXiXj(i, j) \quad (4.2)$$

$$\times TPSTRANS(i, j) \times PoidsElem(s)$$

$$C_3 = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} Entrepot(i, t) \times C_{stock}(i) \quad (4.3)$$

La fonction-objectif se compose de trois éléments comme précédemment que sont les coûts de processus C_1 , les coûts de transports entre les processus C_2 et les coûts de stockage C_3 . La

formulation de ces trois composantes des coûts est revue pour prendre en compte les modifications des paramètres du modèle. Ils s'expriment comme suit dans les équations (4.1), (4.2) et (4.3).

La fonction-objectif est donc exprimée par l'équation (4.4) à minimiser :

$$\text{Minimiser} \quad \text{CoutMin} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (4.4)$$

4.2.3.2 Contraintes du problème

Les contraintes du modèle sont également remaniées en profondeur, afin de répondre aux hypothèses nouvelles. Elles ont pour objectif de fixer les définitions des stocks et produits en transits, d'assurer la cohérence entre les quantités requises et les quantités produites, ou encore d'assurer l'équivalence des envois et des réceptions de marchandises. En d'autres termes, la cohérence physique liée à l'introduction des quantités et du paramètre temporel est définie parmi ces nouvelles contraintes.

Les premières contraintes concernent la définition des variables :

Binarité de la variable Y

$$\forall p \in P, \quad Y(p) \in \llbracket 0 ; 1 \rrbracket \quad (4.5)$$

Binarité de la variable X

$$\forall p \in P, i \in I, t \in T \quad X(p, i, t) \in \llbracket 0 ; 1 \rrbracket \quad (4.6)$$

La variable E appartient est une matrice d'entiers naturels

$$\forall s \in S_{mob}, i \in I, j \in I, t \in T, \quad E(s, i, j, t) \in \mathbb{N} \quad (4.7)$$

La variable Entrepot est positive

$$\forall i \in I, t \in T, \quad \text{Entrepot}(i, t) \in \mathbb{R}^+ \quad (4.8)$$

Les contraintes suivantes définissent le modèle :

1. *Cohérence entre les productions et les consommations*

Il s'agit d'assurer que pour tous les éléments qui sont consommés au cours d'un processus ont été produits par un autre processus grâce à l'équation (4.9). L'élément $s = 1$ (le bâtiment final) n'est pas concerné par cette contrainte, car il n'est pas consommé. Il relève de la contrainte 2 ci-après.

$$\forall s \in S \mid s > 1, \sum_{p \in P} [T_{s,p} \times Y(p) \times Q_{prod}(p)] = 0 \quad (4.9)$$

2. *Obligation de choix entre les différentes architectures possibles*

Il s'agit ici de contraindre le programme à choisir un et un seul des processus disponibles pour la réalisation du bâtiment ($s = 1$), par l'équation (4.10). Contrairement à la contrainte précédente, le processus n'ayant pas de successeur, la valeur du second terme de l'équation sera 1 et non plus 0.

$$\sum_{p \in P} [T_{1,p} \times Y(p)] = 1 \quad (4.10)$$

3. *Production des quantités requises*

Cette contrainte vise à assurer que les périodes d'activité d'un processus chez un fournisseur sont suffisantes pour répondre aux quantités demandées par la nomenclature du projet, sans les dépasser. Elle prend notamment en compte la productivité par période des fournisseurs pour le processus considéré.

$$\forall p \in P, \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} X_{p,i,t} \times Productivite(i, p) = Y(p) \times Q_{prod}(p) \quad (4.11)$$

4. *Restrictions sur les expéditions*

Afin d'assurer la cohérence du programme et de n'expédier que des éléments produits en amont ; ainsi que pour n'envoyer des éléments qu'en étant certains d'avoir un délai suffisant pour les recevoir avant échéance de l'horizon de planification, les trois

équations suivantes sont mises en place. L'équation (4.12) représente un choix arbitraire qui permet la cohérence du programme en évitant un envoi de marchandises qui ne pourra pas être comptabilisé dans les réceptions. Pour cela, nous avons choisi d'interdire les expéditions entre la période 1 et la période $t = TpsTranspMAX$. De la même manière, afin d'éviter des transports trop tardifs une date butoir est fixée pour les expéditions, correspondant à $t = Delais - TpsTranspMAX$. Cette limite correspond à l'équation (4.13). Enfin l'équation (4.14) représente l'impossibilité d'expédier des éléments d'un fournisseur vers lui-même, et l'équation (4.15) impose de n'effectuer des envois de lots que vers des fournisseurs actifs pour le processus successeur.

$$\forall s \in S_{mob}, (i, j) \in I^2, t \in [1; TpsTranspMAX], \quad E(s, i, j, t) = 0 \quad (4.12)$$

$$\forall s \in S_{mob}, (i, j) \in I^2, t \in [Delais - TpsTranspMAX ; Delais], \quad (4.13)$$

$$E(s, i, j, t) = 0$$

$$\forall s \in S_{mob}, i \in I, t \in T, \quad E(s, i, i, t) = 0 \quad (4.14)$$

$$\forall s \in S_{mob}, i \in I \quad \sum_{j \in I, j \neq i} \sum_{t \in T} [E(s, j, i, t) \times Lot(s)] \quad (4.15)$$

$$= \sum_{p \in Succ(s)} \sum_{t \in T} X_{p, i, t} \times Productivite(i, p) \\ \times Besoin(s, p)$$

5. Réception des marchandises envoyées

L'ensemble des marchandises expédiées depuis un fournisseur est reçu chez un autre fournisseur, après un délai correspondant au temps de transport entre les deux. La conjugaison de cette contrainte, présentée dans l'équation (4.16), et de la précédente permet d'assurer qu'aucune marchandise ne disparaisse en cours de route.

$$\forall s \in S_{mob}, i \in I, t \in [TpsTranspMAX + 1 ; Delais], \quad (4.16)$$

$$R(s, i, t) = \sum_{i \in I | i \neq j} \left(E(s, j, i, t - TPSTRANS(i, j)) \times Lot(s) \right) \geq 0$$

6. *Définition de l'état de production et de consommation à chaque période*

Cette contrainte associe à la matrice *Enchainement* l'état des production et consommation de produit s à chaque période et pour chaque fournisseur à l'issue du processus p . Cela permet de traduire les activités lors du déroulement du projet et permettra de prendre en compte les variations de stocks.

$$\forall p \in P, s \in S, i \in I, t \in T, \quad (4.17)$$

$$Enchainement(p, i, t, s) = T_{s,p} \times X_{p,i,t} \times Productivite(i, p)$$

7. *Définition des quantités en cours de transit*

Afin d'assurer la cohérence physique, la contrainte (4.18) assure que les éléments fixes ne seront jamais transportés. Nous définissons les quantités en cours de transport entre les fournisseurs, à chaque période avec la contrainte (4.19).

$$\forall s \in S_{fixe}, i \in I, t \in T, \quad Transit(i, t, s) = 0 \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} \forall s \in S_{mob}, i \in I, t \in [2; Delais], Transit(i, t, s) & \quad (4.19) \\ &= Transit(i, t - 1, s) \\ &+ \sum_{j \in I | j \neq i} E(s, i, j, t) \times Lot(s) - R(s, i, t) \geq 0 \end{aligned}$$

8. *Définition des stocks à chaque période*

La définition des stocks est encore une fois séparée entre les stocks d'éléments fixes avec l'équation (4.21), et les stocks d'éléments transportables dans l'équation (4.22). Dans les deux cas, cette définition se base sur la somme pour tous les processus des composantes de la matrice *Enchainement* ; ce qui permet d'enregistrer dans les stocks à chaque période et chez chaque fournisseur, les consommations et productions. S'ajoutera à cela les expéditions et réceptions pour ce qui concerne les éléments mobiles. L'équation (4.20) définit le cas de la première période pour tous les éléments.

$$\forall s \in S, i \in I, Stock(i, 1, s) = \sum_{p \in P} Enchainement(p, i, 1, s) \geq 0 \quad (4.20)$$

$$\forall s \in S_{fixe}, i \in I, t \in [2; \text{Delais}], \quad (4.21)$$

$$\text{Stock}(i, t, s)$$

$$= \text{Stock}(i, t - 1, s) + \sum_{p \in P} \text{Enchainement}(p, i, t, s) \geq 0$$

$$\forall s \in S_{mob}, i \in I, t \in [2; \text{Delais}], \text{Stock}(i, t, s) \quad (4.22)$$

$$= \text{Stock}(i, t - 1, s) + \sum_{p \in P} \text{Enchainement}(p, i, t, s)$$

$$+ R(s, i, t) - \sum_{j \in I | i \neq j} E(s, i, j, t) \times \text{Lot}(s) \geq 0$$

9. Lieux de stockage autorisés

Afin de correspondre au mieux à la réalité d'un projet, et aux hypothèses choisies pour le programme, nous avons ajouté une contrainte empêchant le stockage d'un élément mobile chez un fournisseur qui n'a pas été sélectionné pour la réalisation du projet. Cette contrainte est assurée par l'équation (4.23) qui assure que les stocks de produit s chez un fournisseur sont limités à la production totale de s chez ce fournisseur, pour par l'ensemble des besoins en produit s pour qu'il réalise un processus successeur (pour lequel il aurait été choisi).

$$\forall s \in S, i \in I, t \in T, \quad (4.23)$$

$$\text{Stock}(i, t, s)$$

$$\leq \sum_{t' \in T} \sum_{p \in \text{Succ}(s)} [\text{Besoin}(s, p) \times X_{p, i, t'}]$$

$$\times \text{Productivite}(i, p)]$$

$$+ \sum_{t' \in T} \sum_{p \in P} [\text{Production}(p, s) \times X_{p, i, t'}]$$

$$\times \text{Productivite}(i, p)]$$

10. Définition de l'inventaire

L'introduction des quantités implique de gérer également l'inventaire au complet, c'est-à-dire la somme des stocks chez l'ensemble des fournisseurs et des éléments en

transit. En effet, cette somme doit respecter les quantités maximales à produire, tout en prenant en compte l'ensemble de ce qui est produit et consommé. L'équation (4.24) traduit ces attentes.

$$\forall s \in S, t \in T, \text{Invent}(s, t) = \sum_{i \in I} \text{Stocks}(i, t, s) + \sum_{i \in I} \text{Transit}(i, t, s) \quad (4.24)$$

11. Contrainte sur la variable de décision Entrepot

La variable *Entrepôt* permet de sommer les volumes occupés par les stocks chez un fournisseur sur l'ensemble des périodes. Les coûts de stockage sont considérés comme étant les mêmes par unité de volume, quel que soit l'élément. Ainsi la variable est définie par l'équation (4.25)

$$\begin{aligned} & \forall i \in I, t \in [2 ; \text{Delais}], \text{Entrepot}(i, t) \\ & \geq \sum_{t' \in T, t' \neq t} \sum_{s \in S_{mob}} \left[\sum_{p \in P} \text{Enchainement}(p, i, t', s) \right. \\ & \quad \left. + R(s, i, t') - \sum_{j \in I} E(s, i, j, t') \times \text{Lot}(s) \right] \times \text{Volume}(s) \end{aligned} \quad (4.25)$$

4.2.4 Validation du modèle

La nouvelle formulation du modèle est testée sur un exemple pour lequel toutes les quantités d'éléments à produire sont ramenées à 1. Il s'agit de comparer les résultats que donnera le nouveau modèle à ceux que donne l'ancien pour un projet identique. Les deux modèles, optimisant les coûts tous les deux, devraient alors donner les mêmes résultats pour ce qui est des choix de partenaires pour un processus et des coûts de production. Seuls les aspects de planification, et ainsi les coûts de stockage seront différents. La planification dans la première version est en effet réalisée selon un processus prédéterminé que nous avons implanté, tandis que la seconde est totalement libre, en dehors des contraintes de cohérence que nous avons fixé dans la formulation du programme. Les coûts de stockage ne sont donc pas pris en compte lors de cette vérification, nous choisissons de les considérer comme nuls. De même nous ne prenons

pas en compte les planifications issues des deux formulations pour nos comparaisons. Nous ne pouvons pas non plus prendre en compte dans la comparaison les coûts de transports, car le second modèle faisant intervenir une variable de décision supplémentaire sur les coûts de transports (liée au besoin d'introduire une date d'expédition dans le second modèle) les contraintes pesant sur cette variable influent fortement les autres choix. Nous observons ainsi le choix pur et simple des partenaires pour la réalisation des processus. Les données de l'exemple choisi sont similaires à celles utilisées pour le premier modèle : nous modifions uniquement les temps de production afin d'en enlever la composante aléatoire pour avoir des résultats utilisables. Le second modèle impliquant de définir auparavant l'horizon de planification, nous faisons fonctionner le premier modèle et entrons la valeur du temps de réalisation obtenue pour déterminer le nombre de périodes pour faire tourner le second modèle.

Les résultats montrent que l'on retrouve les mêmes choix de fournisseurs pour les processus à travers les deux modèles, c'est-à-dire, en considérant les choix de la comparaison, entre un modèle n'effectuant que les choix isolément de la planification et un modèle qui prend en compte l'aspect temporel et de planification au cours de l'optimisation. Il y a donc une cohérence entre les deux modèles, mais la seconde version souligne les manques de la première. L'influence que prend la planification des transports sur le résultat du modèle nous montre que l'optimisation des coûts séparément de la répartition des tâches dans le temps est une approximation très forte pour le résultat final.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS ET DISCUSSION

La réalisation du second modèle nous a permis de construire d'optimiser la chaîne logistique sur un exemple d'architecture relativement simple, en intégrant des problématiques plus complètes que dans le premier. Nous avons ainsi pu mieux estimer les coûts de stockage, optimiser les délais de construction ou encore prendre en compte les quantités de matériaux dans la conception de la chaîne logistique. Nous nous proposons ici d'analyser ces résultats et de les discuter. Pour ce faire nous allons dans un premier temps analyser les résultats du modèle avec les éléments présentés ci-dessus. Nous proposerons ensuite quelques adaptations aux données pour évaluer le comportement du modèle dans trois scénarios différents.

5.1 Interprétation des résultats du second modèle

La résolution du modèle par le solveur Fico® Xpress Optimizer nous fournit avec les valeurs fixées en entrée une valeur optimisée des coûts de construction du projet. Le modèle est résolu en générant un total de 16 104 contraintes, 18 998 variables, en un temps de 3810 secondes. Nous obtenons une tarification pour le projet s'élevant à 71 488 \$ avec les données choisies et présentées en Annexe III, et un horizon de planification de 300 périodes. Le détail des coûts nous indique un coût de réalisation des processus de 58 514 \$, des coûts de transports s'élevant à 12 835 \$, et des coûts de stockage estimés à 139 \$. Une nouvelle fois, le programme nous permet d'obtenir également l'ensemble des processus sélectionnés pour la réalisation de l'architecture grâce à la variable $Y(p)$. Dans notre cas nous obtenons le choix des processus tel que présenté dans le Tableau 5.1. L'analyse de la matrice $X(p, i, t)$ nous permet d'associer dans ce même tableau les fournisseurs sélectionnés pour chaque processus.

Tableau 5.1 Les processus sélectionnés pour la réalisation du modèle

P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$Y(p)$			1		1		1			1	1	1	1	1	1
I			1		1		3			7	5	5	7	7	7

L'ensemble des valeurs binaires prises par $X(p, i, t)$ nous permet d'obtenir une planification des tâches quotidiennement, en nous indiquant pour chaque processus p les périodes où il est actif chez le fournisseur i . On peut alors construire une représentation de ces résultats sous la forme d'un graphique prenant en ordonnée les processus et en abscisse le temps. Chaque trait bleu nous indique que le processus concerné est actif sur la période correspondante, nous permettant ainsi une visualisation de l'enchaînement des étapes du projet sur l'horizon de planification. Cette représentation est donnée en figure 5.1.

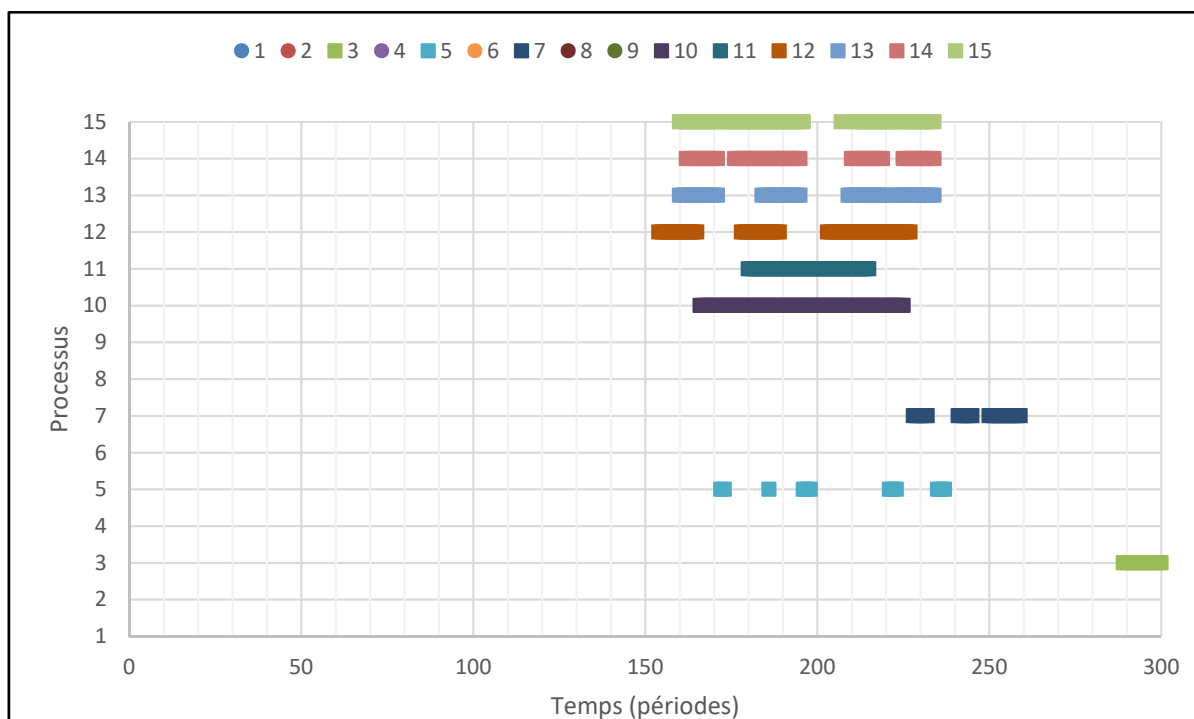


Figure 5.1 Représentation graphique de la répartition des activités sur l'horizon de planification

Nous observons que le temps de réalisation complète du projet de construction est de 300 jours, à partir de la première période du projet. Si les activités se trouvent groupées, il n'y a pour autant pas d'optimisation des temps de réalisation des processus : il s'agit là de l'influence des coûts de stockage, dans la fonction-objectif, qui pousse à diminuer les durées de présence d'éléments dans les stocks. Un essai en supprimant les coûts de stockage permet en effet de constater que les activités se répartissent sur l'ensemble de l'horizon de planification, avec une multitude de périodes d'inactivités.

L'observation de la matrice *Transit* ainsi que des matrices *E* et *R* nous permet de constater la bonne prise en compte des éléments transportés. Tous les éléments expédiés visibles dans la matrice *E* se retrouvent reçus dans la matrice *R* après un délai qui correspond au temps de transport entre le fournisseur et le récepteur, temps répertorié dans la matrice *TPSTRANS*. La matrice *Transit* recense le nouveau lot expédié jusqu'à sa réception, permettant ainsi d'assurer le suivi prévu de l'inventaire complet, chez les contractants ou en cours de route. Les figures 5.2 et 5.3 permettent de visualiser ces suivis, avec respectivement la représentation des stocks pour l'élément 9 chez les différents fournisseurs à chaque période *t* de l'horizon de planification, et l'évolution de l'inventaire (stock plus éléments en cours de transport). On observe bien une baisse occasionnelle et soudaine des stocks sur des temps correspondant aux transports, avant leur réapparition après une durée (7 jours) correspondant au temps de trajet entre les deux fournisseurs, tandis que le niveau de l'inventaire reste lui stable, aux consommations d'éléments près. L'ensemble des baisses plus progressives des stocks représente les consommations des divers éléments au cours des processus et correspond aux périodes d'activité, donc de consommation des éléments : nous pouvons considérer ainsi la traduction du processus 9 sur la figure 5.3 représentant l'évolution de l'inventaire. On constate en effet que lorsque la quantité de produit 4 en inventaire augmente, dans le même temps les quantités de 7 et 8 baissent dans une proportion de 3 pour 1, conformément à ce que nous présente la matrice de transition.

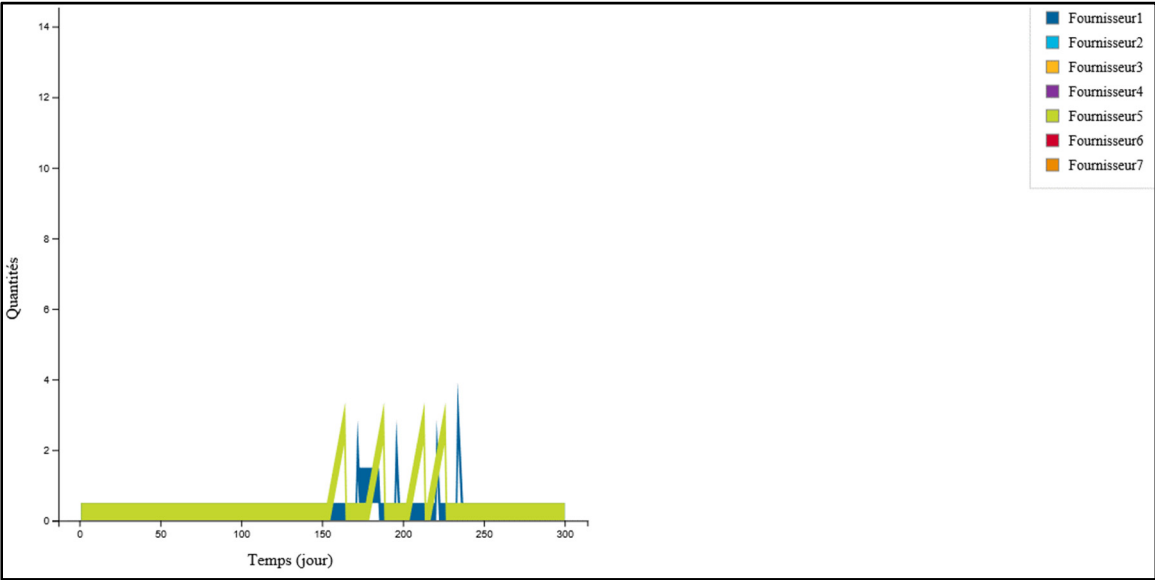


Figure 5.2 Évolution des stocks de produit 9 chez les différents fournisseurs

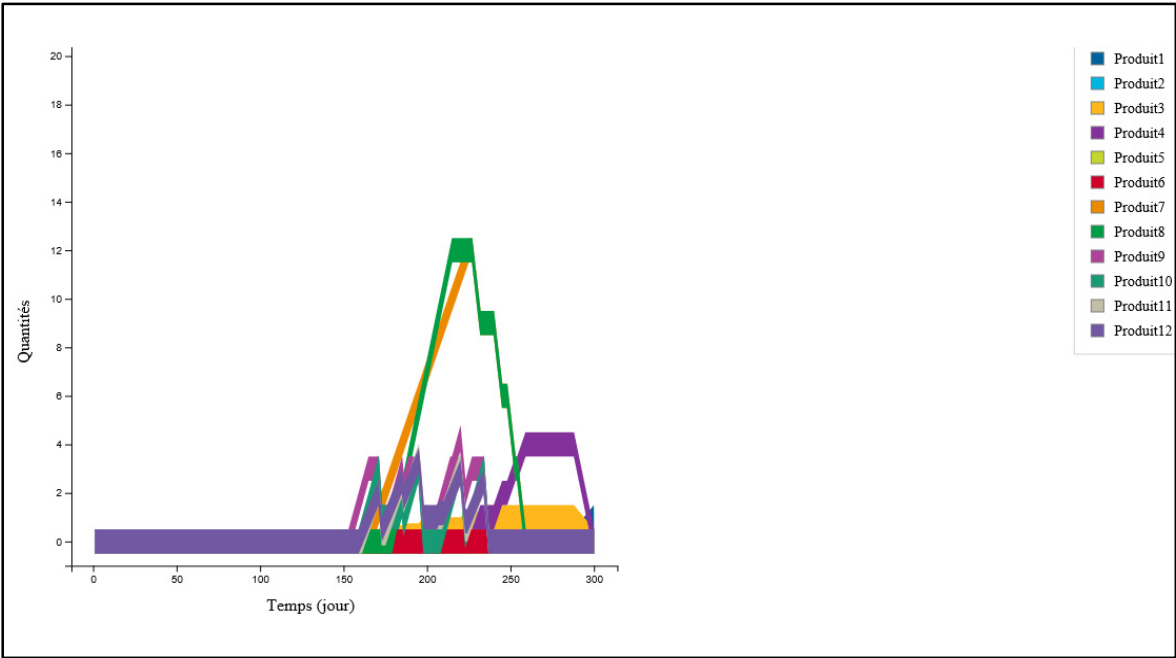


Figure 5.3 Évolution du nombre d'unités des différents éléments s en inventaires

5.2 Scénarios d'essais du modèle

Les différents graphes présentés ci-dessus traduisent visuellement les valeurs prises par les variables de décision et les autres variables du modèle. Elles nous permettent donc par leur analyse d'avoir une vision complète du déroulement prévu du projet pour faire face aux contraintes représentées. Nous avons vu que ce déroulement d'un projet de construction est soumis à diverses contraintes, telles que l'encombrement des sites de construction, qui ont pour conséquence d'entraîner des endommagements et des surcoûts. Nous chercherons désormais à observer l'évolution des valeurs de sortie du modèle lorsque nous modifions les contraintes, pour constater ainsi le comportement du modèle dans différentes situations. Dans ce but, nous proposons trois analyses qui feront varier chacun un aspect des contraintes, et nous comparerons les résultats obtenus avec les résultats de base présentés juste avant. La première portera sur l'influence des capacités de stockage chez les fournisseurs et sur le site de construction; la seconde analyse cherchera à pallier l'absence d'optimisation des temps de réalisation d'un modèle en introduisant un surcoût au-delà d'une certaine date butoir, la réaction de l'organisation de la chaîne logistique sera notamment observée

5.2.1 Analyse 1 : Influence des limites de stockage sur la chaîne logistique.

Dans cette analyse, nous choisissons d'introduire une limite maximale quant à la capacité de stockage des différents fournisseurs dans leur entrepôt et sur le site du projet pour observer l'influence sur la conception de la chaîne logistique et le déroulement du projet. La durée de l'horizon de planification est fixée à 300 jours. Parallèlement à cela nous réduisons également la taille des lots par rapport à ce que nous avons fixé dans l'Annexe III, afin que le modèle reste cohérent avec la nouvelle contrainte. Cette limitation de stock est traduite par l'équation (5.1) qui s'ajoute aux autres édictées dans le chapitre 4. Elle ne s'applique qu'aux éléments mobiles.

$$\forall i \in I, t \in T, \sum_{s \in S_{mob}} Stocks(i, t, s) \times Volume(s) \leq Espace(i) \quad (5.1)$$

Le paramètre *Espace* traduisant la place disponible chez les fournisseurs sera celui sur lequel nous jouerons pour observer le comportement du modèle lorsque ces places disponibles varient. Les valeurs initiales de ce paramètre sont fournies dans le Tableau 5.2.

Tableau 5.2 Espace disponible chez les fournisseurs (en mètre cube)

<i>Fournisseur i</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
<i>Place disponible (m3)</i>	6	4	3	4	4	5	4

Les valeurs de ces espaces seront modifiées pour différents scénarii, elles seront multipliées successivement par 1, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ puis seront arbitrairement changées pour un dernier essai. Ces résultats de ces scénarii (identifié respectivement de A à E) sont présentés et analysés ci-dessous.

5.2.1.1 Scénario A :

Dans ce scénario les valeurs limites de stockage sont telles que présentées dans le tableau 5.2 et nous obtenons un coût de 71 571 \$ pour un projet réalisé en 252 périodes. Les coûts de processus s'élèvent à 58 514 \$, ceux de transports à 12 835 \$, et les coûts de stockage à 222 \$. La figure 5.4 nous montre la répartition des stocks des différents éléments tout au long du projet. La figure 5.5 nous montre le taux d'occupation de la place disponible chez les différents fournisseurs tout au long du projet. Enfin le Tableau nous indique les fournisseurs choisis.

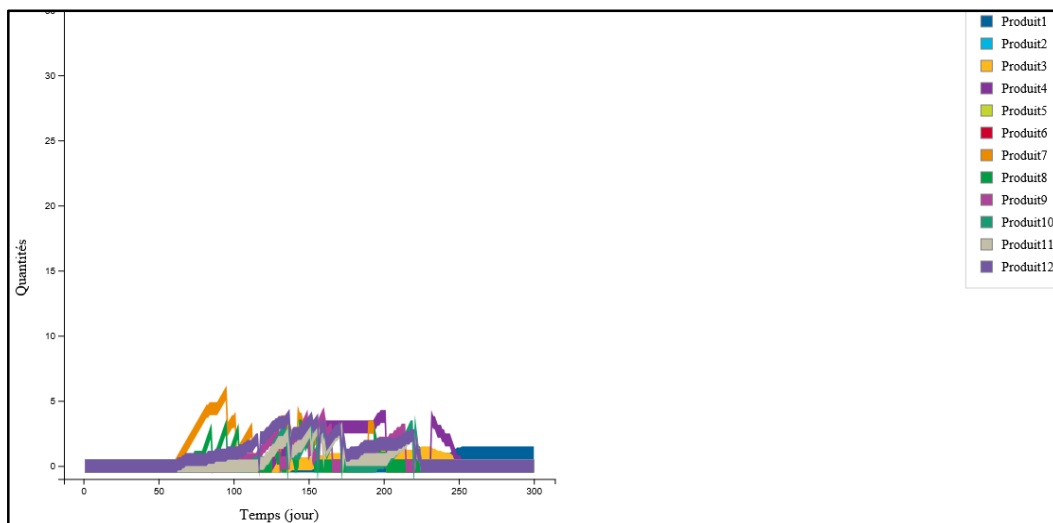


Figure 5.4 Évolution des stocks pour le scénario 1-A (en unités)

Nous observons dans ce premier essai que les limitations de stocks sont gérées aisément par le modèle, car à aucun moment du projet les espaces libres pour le stockage ne sont saturés, comme nous la montre la figure 5.5, la marge est même large avant l'occupation des tous les espaces. La figure 5.4 nous montre que les quantités sont très limitées : l'influence des coûts de stockage permet déjà une limitation des quantités en stocks. On constate enfin que le choix des fournisseurs n'a pas été modifié par rapport aux résultats de base du modèle, ni les coûts, témoignant ainsi d'une adaptabilité du modèle : les activités ont été réparties différemment pour ne pas saturer le stockage.

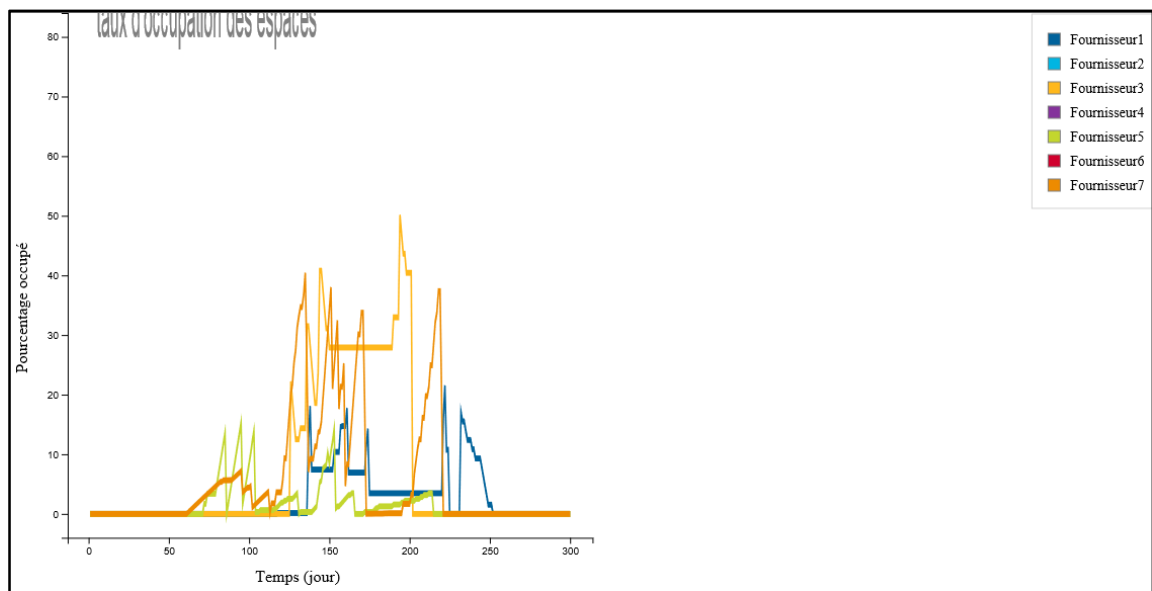


Figure 5.5 Taux d'occupation des espaces chez les fournisseurs pour le scénario 1-A (%)

Tableau 5.3 Fournisseur choisi pour le scénario 1-A

<i>P</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
<i>Y(p)</i>			1		1		1			1	1	1	1	1	1
<i>I</i>			1		1		3			7	5	5	7	7	7

5.2.1.2 Scénario B :

Ce scénario reprend les valeurs limite de stockage présentées dans le Tableau 5.2, en les multipliant par 0,75. On obtient alors un projet coûtant 71 534 \$ et durant 300 périodes. Dans le détail, les coûts des processus s’élèvent à 58514 \$, ceux des stocks à 185 \$ et ceux des transports à 12 835 \$. Les figures 5.6 et 5.7 nous présentent respectivement l’évolution des stocks et les taux d’occupation chez les différents fournisseurs. Les fournisseurs choisis par le modèle restent inchangés.

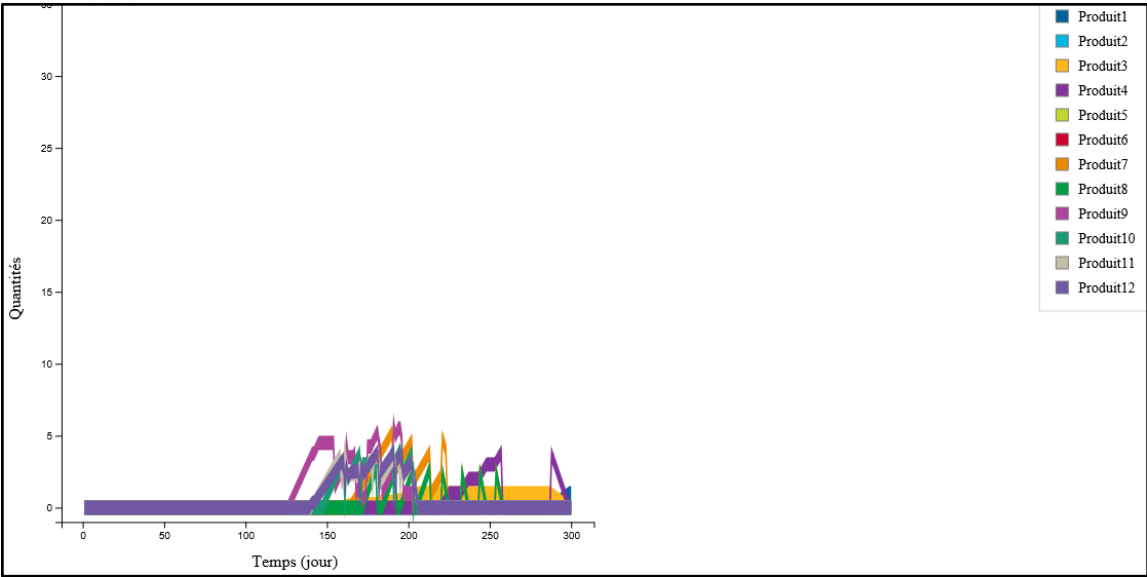


Figure 5.6 Évolution des stocks pour le scénario 1-B (en unités)

Tableau 5.4 Choix des fournisseurs et processus pour le scénario 1-B

<i>P</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
<i>Y(p)</i>			1		1		1			1	1	1	1	1	1
<i>I</i>			1		1		3			7	5	5	5	7	7

On observe ici que le modèle s’accommode de la baisse des espaces disponibles relativement aisément, puisque nous constatons que les stocks ne sont jamais saturés, même si la marge

avant la saturation diminue. Le choix des fournisseurs qui restent identiques montre également une certaine stabilité du modèle pour gérer les stocks limités.

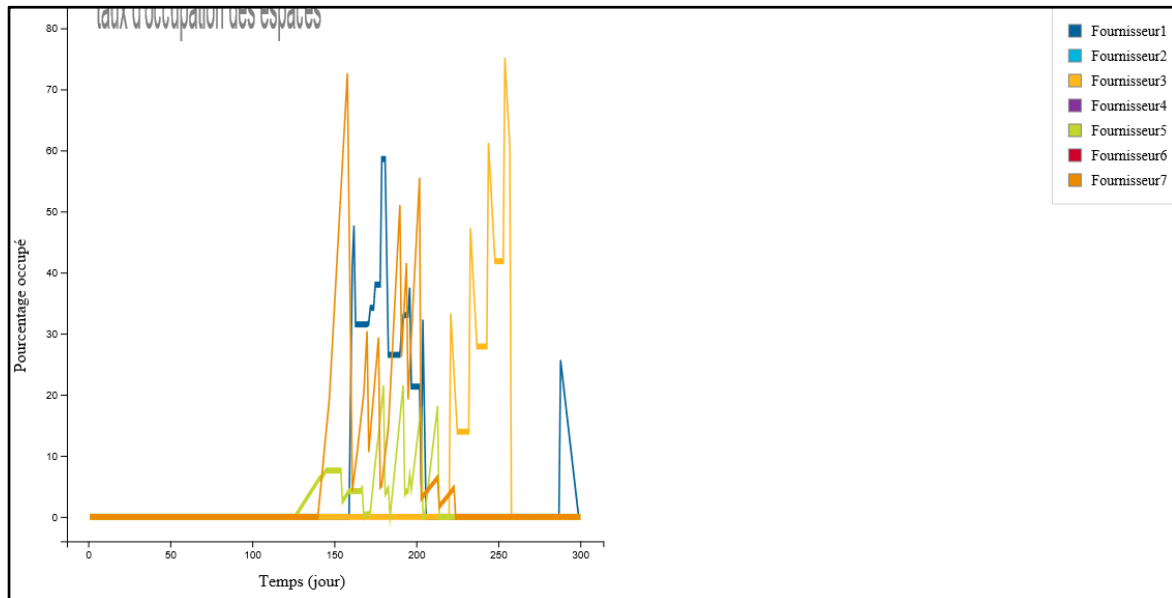


Figure 5.7 Taux d'occupation des espaces disponibles, scénario 1-B (%)

5.2.1.3 Scénario C :

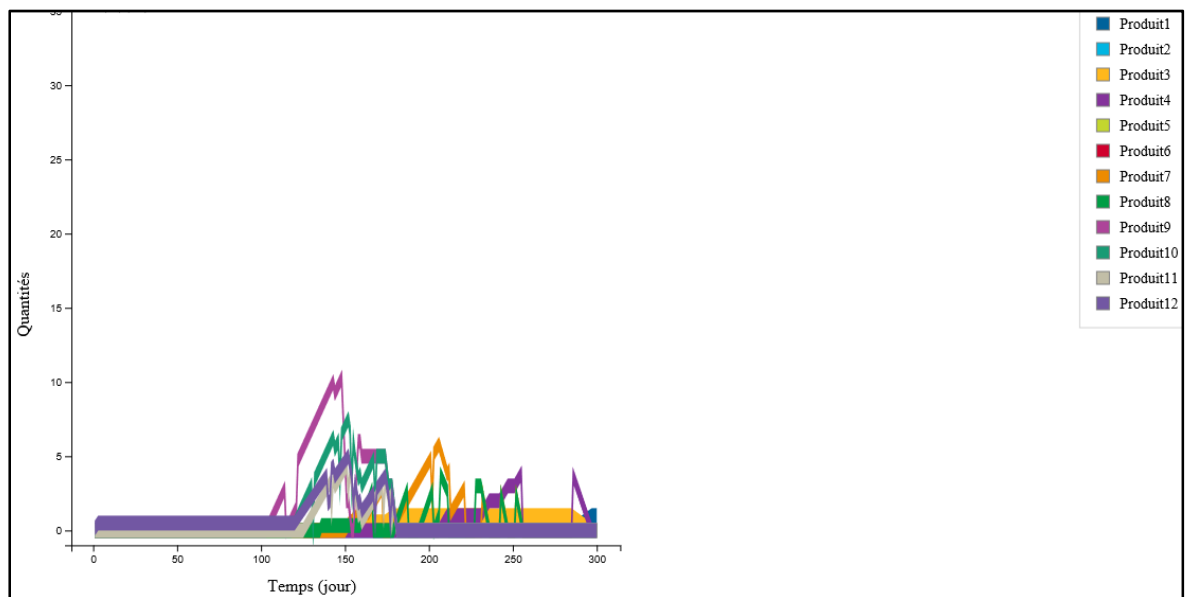


Figure 5.8 Évolution des stocks pour le scénario 1-C (en unités)

Les capacités de stockage de base des fournisseurs sont cette fois divisées par deux. On obtient alors un projet réalisé en 297 périodes et dont le coût s'élève à 71 559 \$. Les figures 5.8 et 5.9 nous présentent respectivement l'évolution des stocks et les taux d'occupation chez les différents fournisseurs. Les fournisseurs choisis par le modèle restent inchangés.

On observe ici que les quantités stockées, présentées sur la figure 5.8, se réduisent, alors que les espaces disponibles sont plus souvent proches de la saturation et globalement plus remplis que dans les cas précédents (figure 5.9). Le programme parvient donc toujours à réguler les stocks, en gardant les mêmes fournisseurs que pour le précédent essai. La répartition des coûts nous indique que la part du stockage s'élève à 210 \$, tandis que les transports et les processus restent identiques à respectivement 12 835 \$ et 58 514 \$. Nous constatons donc que le modèle répartit différemment les stocks et les activités, puisque cette fois la première activité début et à la période 1, pour s'accommoder de la baisse des espaces disponibles.

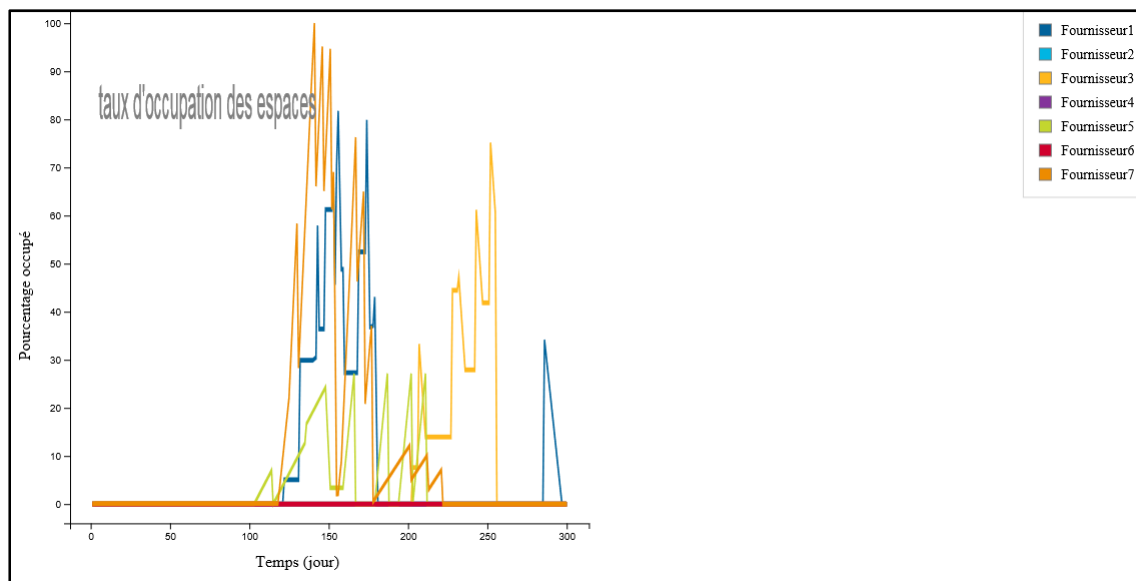


Figure 5.9 Taux d'occupation des places disponibles, scénario 1-C (%)

5.2.1.4 Scénario D :

Cet essai introduit de nouvelles limitations aux volumes des stocks chez les différents acteurs, qui sont volontairement restrictives sauf pour l'entrepreneur général (1) qui doit pouvoir

recevoir les quantités nécessaires à la réalisation des éléments fixes du bâtiment. Le Tableau 5.5 présente ces nouvelles limites. Les valeurs choisies sont volontairement restrictives afin de tester les limites de la réaction du modèle. Mais pour être cohérents avec ces nouvelles limites, nous abaissons les tailles des lots, car les lots sont nécessairement stockés chez les fournisseurs lorsqu'ils ne sont pas complets, en attendant de l'être pour pouvoir être expédiés. Des lots trop importants avec les nouvelles limites de stockage auraient donc pour effet de rendre impossible la résolution du problème. Les nouvelles tailles de lots sont données dans le Tableau 5.5. En pratique, seuls les lots de modules sont modifiés, car les lots d'éléments de base sont suffisamment peu volumineux pour rester tels quel.

Tableau 5.5 Nouvelles valeurs de limitation des volumes de stocks

<i>Elément</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
<i>Taille lot (unités)</i>	1	2	2	3	3	3	3	2	2

Tableau 5.6 Nouvelles valeurs des tailles de lots

<i>Fournisseur i</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
<i>Place disponible (m3)</i>	5	1,33	1	3	1,23	2	1,33

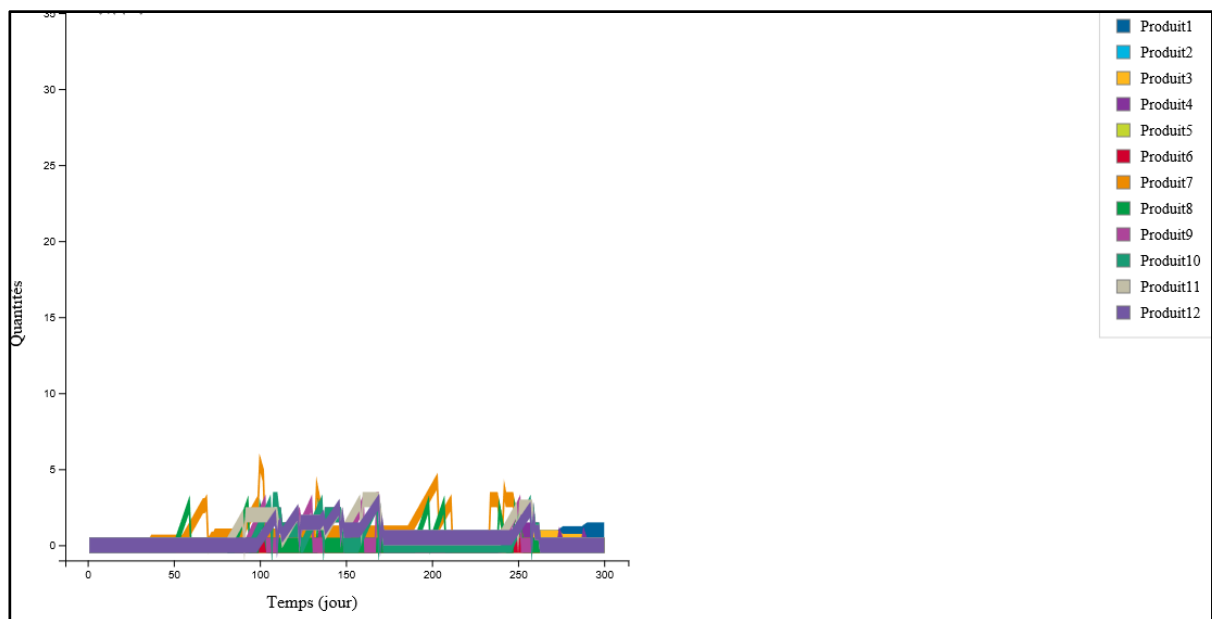


Figure 5.10 Évolution des stocks (en unités) pour le scénario 1-D

Le programme nous délivre un résultat avec un coût global de 71 540 \$, dont 191 \$ pour le stockage, 58514 \$ pour les processus, et 12 835 \$ pour les coûts de transports. Les processus sélectionnés restent inchangés. On observe ici encore une baisse importante des quantités stockées traduisant un étalement des productions permettant une consommation plus rapide des éléments réalisés. Cet étalement se constate notamment dans la répartition temporelle des stocks, qui montre que la quasi-totalité de l'horizon de planification est utilisée. En observant les processus actifs, on constate en effet que la réalisation du projet dure 290 périodes, avec la première activité à la période 37. Le programme parvient à nouveau à réaliser une simulation sans dépassement des espaces de stockage disponible, mais on observe un taux d'occupation globalement plus important, notamment pour le fournisseur 3 (possédant le plus petit espace de

stockage.

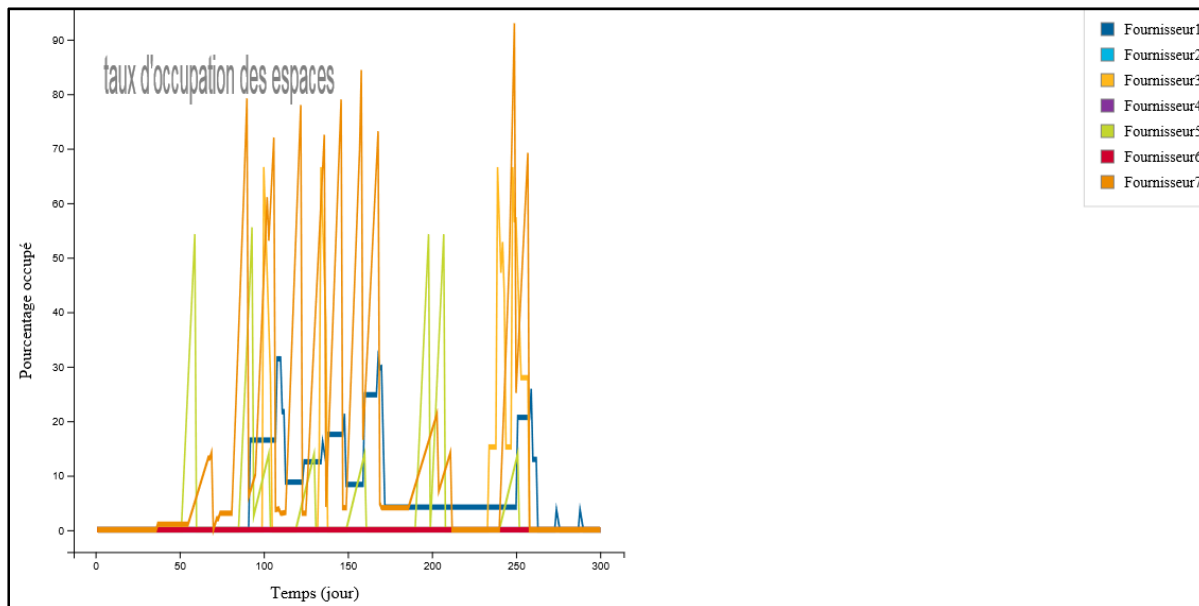


Figure 5.11 Taux d'occupation de l'espace de stockage (%), scénario 1-D

5.2.1.5 Conclusion de l'analyse 1

Les tests en réduisant les capacités de stockage chez les différents fournisseurs nous ont montré la grande adaptabilité des solutions proposées par le modèle pour faire face à cette problématique. Les représentations des évolutions de stocks traduisent en effet une réorganisation de la répartition des activités au cours du projet pour diminuer le temps

d'entreposage des éléments et ainsi respecter la limite de stockage. Les coûts de processus et de transport restent identiques, indiquant une grande stabilité des choix opérés par le système. Seuls les coûts de stockage et les temps de réalisation du projet changent, ce qui indique que le programme réorganise les enchaînements des processus afin de s'approcher d'une production en juste à temps et ainsi diminuer les quantités qui entreront en stocks. L'évaluation des taux d'occupation nous permet de voir que le modèle arrive à réorganiser les choix effectués pour respecter la limite des stocks assez facilement, car il n'y a que peu de saturation. Seul le scénario où les espaces sont divisés par 2 présente un cas de saturation de la place disponible, pour le fournisseur 3, c'est-à-dire celui qui dispose du moins d'espace. Le modèle dispose donc d'une grande flexibilité pour faire face à la contrainte.

5.2.2 Analyse 2 : Incitation à la réduction des délais du projet

Afin de rassembler les périodes d'activités et de diminuer les délais de réalisation, nous ajoutons un surcoût au modèle à partir d'une certaine période. Ce surcoût doit permettre au programme de réorganiser la solution pour diminuer son impact sur le coût de réalisation, et ainsi raccourcir les délais. Ce surcoût est inspiré du « *crashing cost* » présenté par Ye & Xu (2010), simplifié pour pouvoir être adapté au modèle présent. La valeur journalière du surcoût est fixée comme paramètre et s'applique à chaque activité réalisée au-delà d'une certaine date considérée comme l'objectif à atteindre. Le surcoût est intégré directement à la fonction-objectif, en ajoutant un coût C_4 comme présenté dans l'équation (5.2).

$$C_4 = \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T \mid t > \text{DateObj}} X_{p,i,t} \times \text{Surcout} \quad (5.2)$$

Différentes valeurs sont testées pour les paramètres *Surcout* et *DateObj*, permettant d’avoir une vision de l’évolution des solutions du modèle. Les valeurs testées pour *DateObj* seront décroissantes de 25 en 25, de 200 périodes à 125. Les surcoûts appliqués pour chaque valeur de *DateObj* seront : 5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 25 et 50 \$. Une dernière série de scénarii sera également réalisée en fixant le surcoût à une valeur très élevée (1000 \$) pour diminuer au maximum les temps de réalisation. Le temps de réalisation du projet est considéré à partir de la période 1 et jusqu’à la fin de la dernière activité.

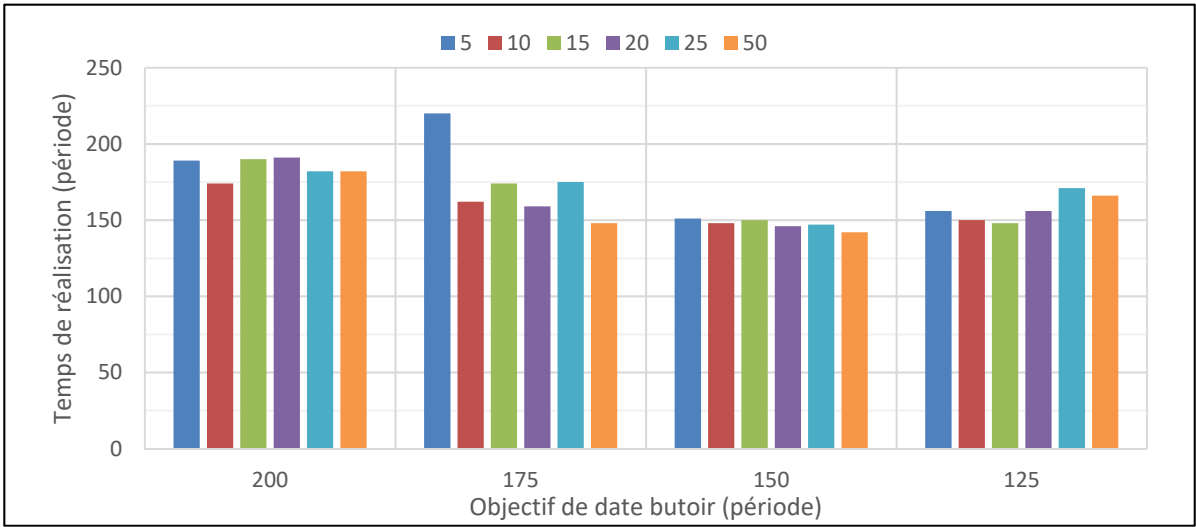


Figure 5.12 Représentation graphique des temps de réalisation pour les différents cas

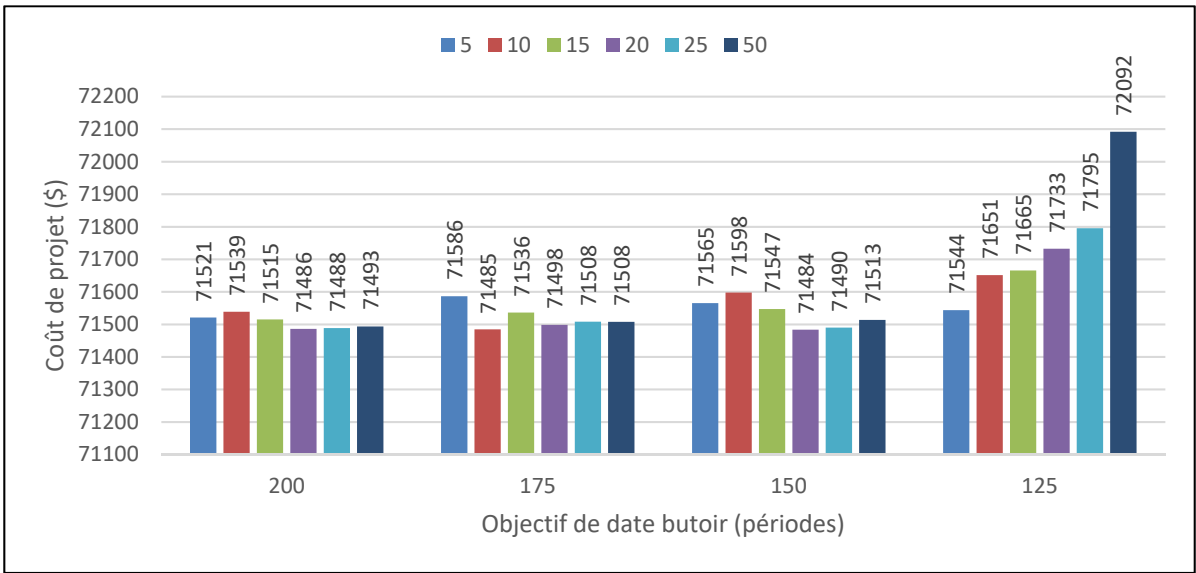


Figure 5.13 Évolution des coûts de projet en fonction des différents scénarii

Les figures 5.12 et 5.13 nous présentent les résultats des différents scénarii de l'analyse 2, en termes de temps de réalisation du projet et de coûts. On observe que le modèle parvient à diminuer les temps de réalisation en réorganisant les activités pour toutes les dates butoirs en objectif sauf celle de 125 périodes. On constate en effet dans ce cas que les temps de réalisation sont toujours supérieurs à l'objectif, ce qui se traduit par une augmentation des coûts totaux dans chaque scénario de sur-tarification. On observe dans le détail sur la figure 5.14, représentant les coûts supplémentaires de retard, que seule la date butoir à 200 périodes est respectée dans chaque configuration, signifiant que le modèle ne rencontre pas de soucis pour cette limite. En revanche pour les dates à 175 et 150 périodes, on remarque que le surcoût à 5 \$ par période de retard est insuffisant pour faire respecter l'échéance, ce qui traduit une réorganisation plus coûteuse de la logistique pour la respecter. De manière générale, on observe que le programme donne pour tous les cas de figure un temps de réalisation variant autour d'un intervalle de 150 à 190 périodes, ce qui laisse penser que le programme trouve naturellement la configuration optimale dans ces durées.

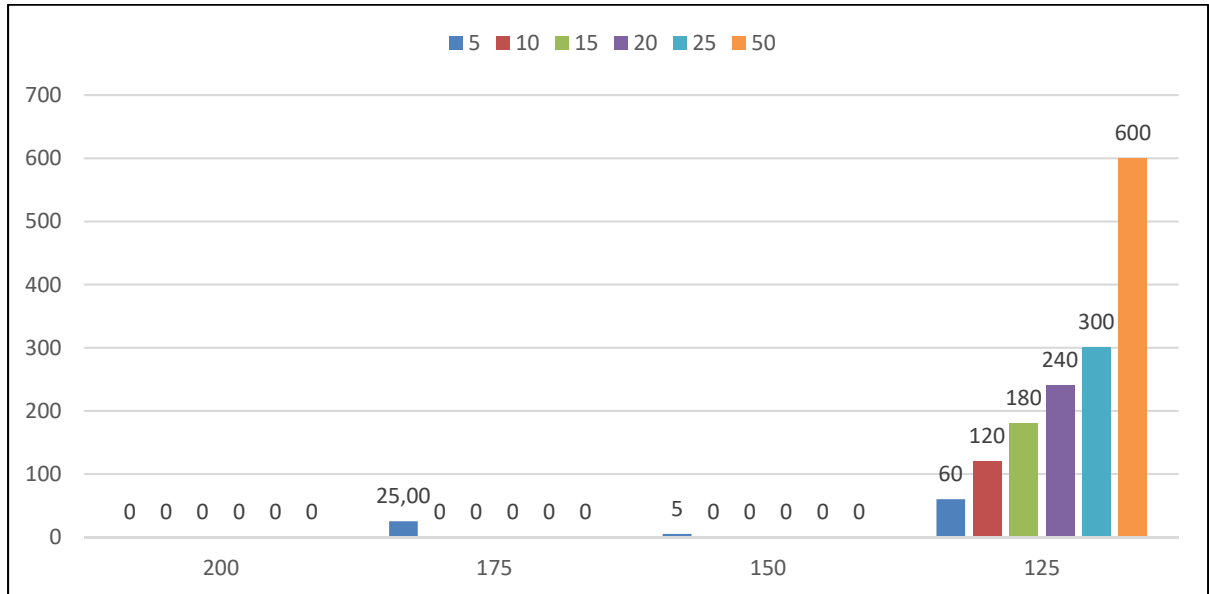


Figure 5.14 Coûts supplémentaires liés au retard dans chaque configuration

Une dernière série d'essais est réalisée en fixant cette fois le coût par période d'activité au-delà de la date butoir à 1 000 \$. L'objectif est ici de diminuer au maximum le temps de réalisation en forçant le programme à trouver d'autres configurations. En prenant en compte les résultats

précédents, les dates butoirs sont choisies de façon décroissante de 25 en 25 à parti de 125 périodes.

Tableau 5.7 Résultats pour un surcoût de 1 000 \$ / activité en retard

DATE BUTOIR (PERIODES)	125	100	75
COUTS (\$)	74 866	74 853	86 904
STOCKAGE (\$)	142	129	181
PROCESSUS (\$)	61 650	61 650	61 650
TRANSPORTS (\$)	13 074	13 074	13 074
RETARDS (\$)	0	0	12 000
TEMPS (PÉRIODES)	125	100	121

Tableau 5.8 Choix des fournisseurs pour un surcoût de 1 000 \$

P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Y(p)			1		1		1			1	1	1	1	1	1
I			1		1		4			7	5	5	7	7	7

On observe dans le Tableau 5.7 que le surcoût de 1 000 \$ permet de faire descendre le temps de réalisation du projet à 100 périodes, sans coût de retard. L'objectif de 75 périodes est en revanche inatteignable et engendre des coûts de retard important : 12 000 \$. On peut constater que le respect de ces temps réduits grâce à un tel surcoût entraîne une augmentation des dépenses de projet de 3 000 \$ environ due aux changements d'un des fournisseurs : le fournisseur 4 est désormais choisi pour le processus 7.

Cette analyse de l'influence des surcoûts sur les choix du modèle nous montre que celui-ci est relativement stable par rapport à ces contraintes : l'architecture de la chaîne logistique ne varie que très peu, le modèle agit sur la répartition des tâches dans le temps. En revanche nous constatons aussi que le modèle adapte tout de même ses choix lorsqu'une contrainte forte est appliquée, preuve de son adaptabilité.

5.3 Discussion des résultats du modèle

La présentation des résultats nous permet de constater que le modèle conçu permet de réaliser la conception d'une chaîne logistique complète d'un projet de construction, des acteurs aux activités réalisées, en passant par les transports des éléments. Nous apportons ainsi une réponse au premier objectif de notre mémoire. Le premier apport de ce modèle, dans ses deux versions, est de constater qu'il est possible d'adapter certaines techniques et certains modèles de la gestion de chaîne logistique du secteur manufacturier au secteur de la construction.

Par ailleurs, l'intérêt du modèle présenté est qu'il intervient dès la phase de conception du projet et permet ainsi d'apporter une vision globale sur le déroulement de celui-ci selon les choix réalisés lors de cette première phase. En outre, il permet de choisir entre plusieurs options de réalisations en fonction de l'organisation de la chaîne logistique, et de répondre ainsi au deuxième objectif de ce mémoire. Conçu comme support d'aide à la décision, il permet d'augmenter la visibilité sur un projet et de favoriser l'intégration et la coopération entre les différentes parties prenantes. L'introduction de cette visibilité supplémentaire dans le déroulement de la construction en fonction de choix effectués en amont doit permettre de réduire les frictions rencontrées classiquement dans ce type d'industrie. Notamment, l'apport d'une première planification cohérente avec l'optimisation des coûts rend possible l'anticipation pour les différents acteurs de la chaîne logistique des besoins du projet à un moment donné de son évolution, et permet ainsi au modèle de répondre au troisième objectif fixé. En outre, l'intégration des différents acteurs dans la conception de la chaîne logistique est facilitée par la possibilité d'échanges de points de vue sur les résultats de la simulation pour s'assurer par exemple de sa faisabilité réelle et de la cohérence avec les différents agendas des fournisseurs notamment.

Le programme tel que développé permet également de clarifier la gestion des stocks, permettant une anticipation des arrivages et une visualisation de l'emplacement et des quantités en stocks ou en transit entre deux fournisseurs. Cet aspect est crucial, car nous avons vu dans la revue de littérature les ralentissements et gâchis que peuvent causer les déficiences dans le

contrôle de l'inventaire. Les encombrements sur le site sont en effet source de désorganisation du chantier conduisant à l'endommagement de certains éléments ou tout simplement au ralentissement de la progression du projet. Dégager une visibilité en ce qui concerne l'arrivée sur le site des éléments, ainsi que les stocks chez les fournisseurs, permet d'envisager une meilleure préparation pour leur entreposage. Nous avons même montré qu'il est possible d'intégrer au modèle une limite fixée au préalable sur les capacités de stockage du site de construction, de sorte que cette problématique d'encombrement puisse influencer sur la planification des livraisons, mais aussi de la fabrication pour ne pas se trouver encombrée chez les fournisseurs.

En incluant la possibilité de fabriquer des éléments hors site, en préfabriqué, notre modèle se place également dans une démarche d'évolution de l'industrie de la construction vers un fonctionnement orienté produit, plus proche de l'industrie manufacturière. Il permet en effet d'inclure une part de standardisation grâce notamment à la focalisation sur les processus. Le modèle fait un pas vers une gestion plus intégrée des activités d'un projet, mais aussi une gestion plus intégrée des projets entre eux, en clarifiant le déroulement de ceux-ci.

Le modèle développé dans ce mémoire, s'il permet la prise en compte de plusieurs problématiques de la construction, reste limité sur d'autres aspects, et appelle à un approfondissement.

Le modèle présenté permet une optimisation uniquement selon les coûts de réalisation. Dans le quatrième chapitre, nous avons inclus une possibilité de considérer les délais dans l'optimisation, en ajoutant un coût journalier et un coût de stockage pour inciter le modèle à utiliser le moins de temps possible. L'ajout d'un surcoût en cas de dépassement d'un délai a permis également d'influencer sur la construction de la chaîne logistique pour minimiser son impact. Toutefois il ne s'agit que de solutions visant d'une certaine manière à fixer un prix au temps, mais en aucun cas nous n'avons d'optimisation des délais ou d'un temps de réalisation. Le développement d'un modèle basé sur l'optimisation de ces temps de réalisation du projet pourrait apporter des informations cruciales pour la prise de décision dans la phase de

conception et planification de la chaîne logistique ; il serait un complément enrichissant aux informations fournies par ce modèle.

D'autre part le modèle développé n'offre pas de prise en compte de certains facteurs fortement influençant sur le déroulement des travaux. Il serait ainsi intéressant d'inclure les aspects concernant l'environnement immédiat du projet de construction (voisinage, circulation routière, problématique urbaines...), aspects que nous avons vus dans la littérature comme pouvant induire des frictions dans l'avancement du projet et engendrer des tensions sur le site. Il faut également noter que le modèle a considéré comme acquis certains aspects logistiques, comme la disponibilité de grues, de camion, etc. pour la réalisation du projet. Cet aspect peut engendrer des difficultés supplémentaires s'il n'est pas correctement anticipé, voire provoquer des retards ou des blocages.

Un troisième point de développement possible concernerait l'actualisation du modèle en fonction de l'évolution du projet. Conçue de façon à être un outil d'aide à la décision lors de la phase de conception et planification, la dynamisation du modèle pour lui permettre de suivre la progression du projet tout en incluant les imprévus et contraintes nouvelles pourrait permettre d'améliorer la visibilité sur les événements tout au long de la construction. Il pourrait s'agir là d'un moyen pour pousser les acteurs à plus d'intégration, donc plus d'efficacité, par une communication régulière des états d'avancement et des blocages.

Il faut enfin souligner, d'un point de vue méthodologique, que le modèle a été développé ici en ne prenant en compte qu'un exemple de projet à réaliser. Il conviendrait, afin de le renforcer, d'appliquer ce modèle à la réalisation d'autres exemples, plus complexes, voire des cas réels. Il est toutefois à noter que le modèle est à rapprocher d'un modèle de planification qui est par définition un modèle dit NP-difficile. Il rencontrera donc une limite en fonction de l'évolution du nombre de variables, son temps de résolution y étant lié de façon exponentielle.

CONCLUSION

L'industrie de la construction est actuellement sujette à de nombreux retards dans l'exécution des projets et dépassements de budget. Cet état de fait est lié à son organisation : morcelé entre de nombreux acteurs intervenant sur un même projet, le manque de coordination et d'intégration de ces parties prenantes cause une inefficacité dans la réalisation et notamment la chaîne logistique. La recherche actuelle tend à orienter cette industrie vers une gestion plus intégrée des projets, tant à travers les différentes phases qu'entre les différents projets. En outre, l'utilisation accrue du préfabriqué constitue un objectif des orientations actuelles, car elle permettra la diminution des temps et des coûts, tout en permettant une approche basée sur la production pour la gestion de la chaîne logistique.

Face à ces constatations, notre mémoire a fixé pour objectif de s'inscrire dans cette démarche d'amélioration de la gestion de chaîne logistique de la construction, en favorisant l'intégration dès les premières phases d'un projet. Nous avons souhaité établir un modèle de conception et d'optimisation d'une chaîne logistique sur un projet de construction en minimisant les coûts. Pour permettre une prise de décision éclairée, nous souhaitons que ce modèle intervienne dès la conception d'un projet de construction. Enfin nous voulions permettre une vision globale du projet en développant une première planification des tâches du projet et de la chaîne logistique correspondante.

La revue de littérature a permis de dégager les méthodes et plus précisément quelques modèles utilisés en industrie manufacturière pour optimiser la conception de la chaîne logistique dès les premières phases de conception du produit. Le choix d'un modèle et son adaptation au contexte de la construction ont servi de base à notre modèle.

Centré sur les processus grâce à une matrice de transition, notre modèle a permis de prendre en compte nombre de contraintes de l'industrie de la construction, telles que les quantités de stocks, les délais de fabrication et de livraison. La matrice de transition a permis de traduire différentes options pour la réalisation du projet, et donc d'offrir la possibilité au modèle de

choisir en fonction des coûts de la chaîne logistique et de réalisation la plus avantageuse. Nous avons également pu introduire un paramètre temporel dans les variables de décision. Si nous n'avons pas d'optimisation en fonction du temps, nous avons pu obtenir une répartition temporelle logique des activités, s'apparentant à une planification.

Notre modèle permet donc d'avoir, au cours de la phase de conception du projet, une vision d'ensemble de son déroulement et des choix tactiques vis-à-vis de la chaîne logistique. Cet aspect en fait un outil d'aide à la décision appréciable pour les entrepreneurs du secteur de la construction, qui répond à un besoin et une demande d'intégration des acteurs de la chaîne logistique dès le commencement d'un projet de construction. Le modèle permet en outre d'utiliser une production hors site d'éléments, qui s'inscrit dans l'orientation générale de l'industrie de la construction, vers des projets plus intégrés et standardisés. L'inclusion du temps dans le modèle et la planification renvoyée par celui-ci permettent enfin une anticipation sur le déroulement du projet, et peuvent servir de base à la collaboration entre les différents acteurs.

Toutefois, l'utilisation d'un seul exemple appelle à élargir le travail sur notre modèle, en utilisant des architectures plus complexes. En outre certaines hypothèses, portant notamment sur les moyens logistiques pourrait être reconsidéré pour rendre le modèle plus exact. L'instauration d'un suivi du déroulement du projet par rapport aux prévisions et la réorganisation de la planification le cas échéant s'avère également une prolongation intéressante du projet. Enfin, l'instauration d'une planification optimisée en temps peut révéler un aspect intéressant que ne comprend pas ce modèle.

ANNEXE I

CONTRAINTES DU PROBLEME DE CHIU & OKUDAN (2011)

$$\sum_p T_{sp} \times Y_p \geq 0 \quad \forall p \in P \quad (A \text{ III-1})$$

$$\sum_p T_{sp} \leq 0 \quad \forall s \in S \quad (A \text{ III-2})$$

$$\sum_i X_{pi} = 1 \quad \forall p \in P \quad (A \text{ III-3})$$

$$\sum_j X_{pj} = 1 \quad \forall p \in P \quad (A \text{ III-4})$$

$$\sum_k X_{pk} = 1 \quad \forall p \in P \quad (A \text{ III-5})$$

$$LEAD = Max(X_{pi} \times L_{pi} + TRANTX_i X_j + X_{pi} \times L_{pj} \quad (A \text{ III-6})$$

$$+ TRANTX_j X_k + X_{pk} \times L_{pk})$$

$$LEAD \leq L_MAX \quad (A \text{ III-7})$$

$$LEAD \geq L_MIN \quad (A \text{ III-8})$$

$$C_1 + C_2 + C_3 \leq C_MAX \quad (A \text{ III-9})$$

$$Y_p, X_{pi}, X_{pj}, X_{pk} \in \{0,1\} \quad (A \text{ III-10})$$

$$L_MAX, L_MIN, C_MAX \geq 0 \quad (A \text{ III-11})$$

Tiré de Chiu & Okudan (2011)

ANNEXE II

ALGORITHME DE LA PROCEDURE ARBORESCENCE

Structure of the project determining algorithm

Input Empty 'Enchainement' matrix, empty 'Arbre' matrix, length of the branch of the nomenclature

Output 'Enchainement' matrix with all information about production time and transport time for each activity and esch branch of the nomenclature.

declarations

length = 3*compteur+1

D = 1..ceil(LeadTime)

Arbre : array(Sb,1..length) of real

end-declarations

forall (p in Pi, s in Sb) :

case Selec(s,p) **of**

 1 : **do**

 Arbre(s,1):= p

 Arbre(s,2):= LEAD(p)

 Arbre(s,3):= 0

 Arbre(s,length) := Arbre(s,2)+Arbre(s,3)

end-do

end-case

end-forall

forall (s in Sb) :

 z := integer(Arbre (s,1))

 e :=s

 r:=4

 o:=z

while (e>1) :

forall (p in P | Selec(e,p)+Selec(e,z)=0) :

 o:=z

 z:=p

 Arbre(s,r):= z

 Arbre(s,r+1) := LEAD(z)

if z in Pj and o in Pi **then**

 Arbre(s,r+2) := sum(i in I, j in J)

 (TRANTXiXj(i,j)*XpiSol(o,i) * XpjSol(z,j))

Structure of the project determining algorithm (end)

```

                                elif z in Pj and o in Pj then
                                    Arbre(s,r+2) := sum(j in J, jj in J)
                                                (TRANTXjXj(j,jj) * XpjSol(o,j) *
XpjSol(z,jj))
                                elif z in Pk and o in Pj then
                                    Arbre(s,r+2) := sum(j in J, k in K)
                                                (TRANTXjXk(j,k)*
                                                XpjSol(o,j) * XpkSol(z,k))
                                end-if
                                Arbre(s,length) += Arbre(s,r+1)+Arbre (s,r+2)
                                r+=3
                                forall(t in S|t<e and Selec(e,z)+Selec(t,z)=0)e:=t
                                end-forall
                            end-while
                        end-forall

forall (s in Sb, l in 1..length) Enchainement(s-Nct,l):= Arbre(s,l)

```

ANNEXE III

DONNEES UTILISEES POUR LE SECOND MODELE

Tableau-A III.1 Coût de réalisation des processus par les différents fournisseurs possibles.

COUTS DES PROCESSUS							
P\I	1	2	3	4	5	6	7
1	692,40						
2	1080,20						
3	1180,40						
4	1175,90						
5	1176,60						
6	981,00						
7			494,80	543,00			
8			591,80	515,04			
9		688,80	709,24				
10						54,00	32,50
11					52,00	40,00	45,50
12					87,00	82,00	
13					79,00	68,00	82,00
14						81,00	78,00
15					76,00		75,00

Tableau-A III.2 Productivité des fournisseurs pour les processus possibles.

PRODUCTIVITE (FRACTION DE PROCESSUS RÉALISÉ PAR JOUR)							
P\I	1	2	3	4	5	6	7
1	0,14						
2	0,09						
3	0,08						
4	0,08						
5	0,08						
6	0,10						
7			0,20	0,17			
8			0,17	0,20			
9		0,14	0,14				
10						0,17	0,20
11					0,33	0,25	0,20
12					0,25	0,17	
13					0,20	0,17	0,25
14						0,25	0,20
15					0,25		0,17

Tableau-A III.3 Données des coûts de stockage chez les différents fournisseurs.

COUT DE STOCKAGE CHEZ LES FOURNISSEURS (PAR M³ OCCUPE)	
FOURNISSEUR	COUT (\$)
1	1.3
2	0.99
3	1.23
4	1.08
5	1.11
6	0.989
7	0.912

Tableau-A III.4 Coût de transport par tonne.

COUTS DE TRANSPORT UNITAIRE JOURNALIER D'UN FOURNISSEUR À L'AUTRE PAR TONNE							
EXP.\DESTIN.	1	2	3	4	5	6	7
1	0,00	616,02	102,72	568,85	575,96	2362,20	127,84
2	616,02	0,00	51,87	103,83	69,78	121,46	491,53
3	102,72	51,87	0,00	307,78	239,33	32,38	384,29
4	568,85	103,83	307,78	0,00	36,15	216,92	467,11
5	575,96	69,78	239,33	36,15	0,00	182,45	452,17
6	2362,20	121,46	1,00E+18	216,92	182,45	0,00	283,21
7	127,84	491,53	384,29	467,11	452,17	283,21	0,00

Tableau-A III.5 Temps de transport d'un fournisseur i vers un fournisseur j

I \ J	1	2	3	4	5	6	7
1	0	6	30	6	6	35	1
2	7	0	40	3	3	25	7
3	30	40	0	40	40	40	30
4	7	3	40	0	3	25	7
5	7	3	40	3	0	25	7
6	35	25	40	25	25	0	35
7	1	6	30	6	6	35	0

Tableau-A III.6 Poids (en tonne) et taille de lot des éléments mobiles

ELEMENT	4	5	6	7	8	9	10	11	12
POIDS (T)	0,70	7,45	1,80	0,01	0,01	0,01	0,01	0,77	0,24
TAILLE LOT (UNITES)	4	2	4	3	3	3	3	2	2

BIBLIOGRAPHIE

- Arashpour, M., Bai, Y., Aranda-Mena, G., Bab-Hadiashar, A., Hosseini, R., & Kalutara, P. (2017). Optimizing decisions in advanced manufacturing of prefabricated products_ Theorizing supply chain configurations in off-site construction. *Automation in Construction*, 84, 146-153.
- Baud-Lavigne, B., Agard, B., & Penz, B. (2016). Simultaneous product family and supply chain design: An optimization approach. *International Journal of Production Economics*, 174, 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.01.015>
- Benkaddour, M. A. (2007). *Utilisation de la modularisation dans la conception des chaînes d'approvisionnement des entreprises du secteur aéronautique*. Ecole de Technologie Supérieure, Montréal, Canada.
- Berden, M. (2017). *Analysis of construction logistics calculation models and factors that obstruct their development*. (D2.1). Amsterdam : Amsterdam University of Applied Sciences.
- Bertram, N., Fuchs, S., Mischke, J., Palter, R., Strube, G., & Woetzel, J. (2019). *Modular construction : From projects to products*. Repéré à <<https://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure>>.
- Chaabane, A., As'ad, R., & Bahroun, Z. (2018). *Towards a BIM-Based Construction Supply Chain Planning Modeling Framework*. International Conference on Project Logistics, June 28-29 2018, Hull, United Kingdom, ISBN: 978-1-5272-2642-5
- Ching, F. D. K., & Adams, C. (2003). *Guide Technique et pratique de la construction* (Léon Collet, Trad.; Modulo). Modulo.
- Chiu, M.-C., & Okudan, G. (2011). An Integrative Methodology for Product and Supply Chain Design Decisions at the Product Design Stage. *Journal of Mechanical Design*, 133(2), 021008. Repéré à <<https://doi.org/10.1115/1.4003289>>
- CIVIC. (2018). *Smart Construction logistique*. Gothenburg, Sweden : Lindholmen Science Park.
- Comelli, M. (2008). *Modélisation, optimisation et simulation pour la planification tactique des chaînes logistiques*. (Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, Clermont-Ferrand, France).
- Evrard Samuel, K., & Cung, V.-D. (2015). Analyse comparée des solutions de logistique urbaine. *Logistique & Management*, 23(1), 7-18. Repéré à <<https://doi.org/10.1080/12507970.2015.11665669>>

- Forgues, E.-C. (2017). *Adaptation d'un modèle de maturité BIM pour les principaux intervenant de la supply chain en construction*. (Mémoire de maîtrise, Ecole de Technologie Supérieure, Montréal).
- Hsu, P. Y., Aurisicchio, M., & Angeloudis, P. (2017). Supply Chain Design For Modular Construction Projects. *LC3 2017 Volume II - Proceedings of the 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, Walsh, K., Sacks, R., Brilakis, I. (eds), Heraklion, Greece, pp. 797-804. Repéré à <<https://doi.org/10.24928/2017/0193>>.
- Jasti, N. V. K., & Kodali, R. (2015). A critical review of lean supply chain management frameworks : Proposed framework. *Production Planning & Control*, 26(13), 1051-1068. Repéré à <<https://doi.org/10.1080/09537287.2015.1004563>>
- João Ribeirinho, M., Mischke, J., Strube, G., Sjödin, E., Blanco, J. L., Patler, R., Biörck, J., Rockhill, D., & Anderson, T. (2020). *The next normal in construction*. 90.
- Khalaf, R. E. H., Agard, B., & Penz, B. (2011). Simultaneous design of a product family and its related supply chain using a Tabu Search algorithm. *International Journal of Production Research*, 49(19), 5637-5656. Repéré à <<https://doi.org/10.1080/00207543.2010.519737>>
- Le, P. L., Elmughrabi, W., Dao, T.-M., & Chaabane, A. (2018). Present focuses and future directions of decision-making in construction supply chain management : A systematic review. *International Journal of Construction Management*, 1-20. Repéré à <<https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1488089>>
- Martel, A. (2005). The design of production-distribution networks : A mathematical programming approach. In *Supply Chain optimization* (Springer, Vol. 98).
- Nepal, B., Monplaisir, L., & Famuyiwa, O. (2012). Matching product architecture with supply chain design. *European Journal of Operational Research*, 216(2), 312-325. Repéré à <<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.07.041>>
- Paksoy, T. (2018). *Lean and green supply chain management : Optimization models and algorithms* (1st edition). Springer Berlin Heidelberg.
- Paquet, M., Martel, A., & Montreuil, B. (2006). *Manufacturing network design with reliable promising capabilities*. Québec : Network organizations technology research center (CENTOR), Université de Laval.

- Tortorella, G. L., Miorando, R., & Marodin, G. (2017). Lean supply chain management : Empirical research on practices, contexts and performance. *International Journal of Production Economics*, 193, 98-112. Repéré à <<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.07.006>>
- Tsinopoulos, C., & Mena, C. (2015). Supply chain integration configurations : Process structure and product newness. *International Journal of Operations & Production Management*, 35(10), 1437-1459. Repéré à <<https://doi.org/10.1108/IJOPM-08-2013-0369>>
- Ye, F., & Xu, X. (2010). Cost allocation model for optimizing supply chain inventory with controllable lead time. *Computers & Industrial Engineering*, 59(1), 93-99. Repéré à <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.03.003>>

