

# Élaboration de règles de conception pour réduire la durée de fabrication des composantes de structures d'acier

par

Mathieu FOKWA SOH

THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE  
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DU  
DOCTORAT EN GÉNIE  
Ph. D.

MONTREAL, LE 25 NOVEMBRE 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Mathieu Fokwa Soh, 2021

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre média une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

## **PRÉSENTATION DU JURY**

CE RAPPORT DE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Daniel Forgues, directeur de thèse  
Département de génie la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Sylvie Doré, codirectrice de thèse  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Yvan Beauregard, président du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Conrad Boton, membre du jury  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

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

M. Charles-Philippe Lamarche, examinateur externe indépendant  
Département de génie civil et génie du bâtiment à l'Université de Sherbrooke

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

LE 27 SEPTEMBRE 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## REMERCIEMENTS

Je ne saurais rédiger ce document sans toutefois témoigner toute ma gratitude à ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce projet de thèse.

Je voudrais par de ce fait remercier mes parents, M. Soh Mathieu et Mme Nantchouang Marteline, mes frères et sœurs, Soh Henri, Njomnang Soh Patrice, Fogang Soh Lucien, Tadoum Soh Joseph, Madjou Clarence Nathie et Meyap Soh Cladissee pour les moyens qu'ils n'ont jamais ménagés pour le déroulement de mes études.

Je voudrais remercier mes amis, frères d'une autre mère Chiasseu Mbeumi Marius T, Takam Kamga Paul, Luc Noel Logabo Billong et Konga Mbah Cedric ainsi que toute la Dream-Team, pour le soutien affectif et moral.

Je voudrais aussi remercier les membres de ma famille d'accueil au Canada, notamment Lionel Njeukam, Nathalie Todam, Emmanuelle Fampou, Wandji Enongene Rody Welvin, Dahlia Tchoukuegno, Lucrese Medjoufen Nguebem, Ludwine Tchatat Raissa.

Je voudrais remercier les membres du Groupe de Recherche en Intégration et en Développement Durable GRIDD, pour les activités et la vie en laboratoire.

Je voudrais remercier ma femme, Vanessa Tchimo Yongta pour son épaulement, sa persévérance et ses encouragements.

Je voudrais remercier le Groupe-Canam, pour la confiance et l'espace qu'ils m'ont réservé dans leur entreprise, pour la poursuite de ces travaux. Je voudrais remercier particulièrement Daniel Barbeau, David Bigras et Génor Fortier pour la disponibilité dont ils ont fait marque durant tout ce travail de thèse.

Enfin, je voudrais remercier mes encadreurs, Daniel Forgues et Sylvie Doré, pour leur encadrement, et leur accompagnement tout au long de ce projet de thèse.



# **Élaboration de règles de conception pour réduire la durée de fabrication des composantes de structures d'acier**

Mathieu FOKWA SOH

## **RÉSUMÉ**

Dans l'industrie de l'Architecture, de l'Ingénierie et de la Construction (AIC – « Architecture Engineering and Construction ». AEC), la non-intégration des connaissances et de l'expérience des entrepreneurs spécialisés (comme les fabricants) pendant la phase de conception contribue à de nombreux gaspillages en termes de qualité, de coût et de délais de construction. Le problème provient du mode de réalisation traditionnel des projets, Conception Contrat, Construction (CCC – « Design Bid Build ». DBB), qui impose une réalisation linéaire et fragmentée, dictée par les plans et devis, et qui n'offre pas aux entrepreneurs spécialisés, l'opportunité de participer à la conception.

Des initiatives comme l'Ingénierie de la Valeur (IV – « Value Engineering ». VE) et la constructibilité ont été proposées pour mitiger ce problème. Ces initiatives, bien que permettant un certain transfert de connaissances entre concepteurs et entrepreneurs spécialisés, se sont principalement concentrées sur la réduction du coût et des risques des projets. De cette façon, le transfert de connaissances est limité et les entrepreneurs spécialisés n'ont guère l'opportunité d'intervenir durant la conception. Dans un deuxième temps, des initiatives se sont concentrées sur le mode d'approvisionnement DBB pour le faire évoluer en favorisant une intégration des connaissances de fabrication dans la phase de conception. Cependant, les solutions proposées ne se questionnent pas vraiment sur l'opportunité de comprendre et de maîtriser les processus comme la fabrication dans le but d'identifier des contraintes à considérer pour la conception. Pourtant, dans les projets de construction dont la structure est en acier, la phase de fabrication des composantes représente de 30 à 40% du coût global des projets.

Dans l'Ingénierie de Développement de Produits (IDP – « Product Development Engineering ». PDE) le transfert de connaissances est formalisé à travers différentes approches et règles de conception telles que la Conception Pour la Fabrication et l'Assemblage (CPFA – « Design For Manufacturing and Assembly ». DFMA). À travers ces règles de conception, les connaissances et l'expérience des fabricants sont disponibles aux concepteurs très tôt dans le développement du produit. De cette façon, les concepteurs peuvent anticiper les contraintes de fabrication et d'assemblage des produits. Une application des règles de conception dans l'industrie de l'AIC peut permettre une meilleure intégration des connaissances et de l'expérience des entrepreneurs spécialisés dès la phase de conception des projets. Cependant, très peu de travaux proposent d'élaborer des règles de conception pour l'industrie de l'AIC.

Cette thèse veut participer à la résolution de ce problème en proposant pour des projets de construction dont la structure est en acier, des règles pour permettre aux concepteurs de

considérer les facteurs à fort impact sur la durée de fabrication des composantes de structures en acier.

Pour arriver à cet objectif, cette thèse propose d'identifier des facteurs de fabrication qui serviront par la suite à la formulation des règles de conception. Trois méthodes sont proposées pour identifier ces facteurs à savoir : une méthode qualitative qui utilise le codage ouvert sur les contenus de Requêtes Pour Information (RPI - « Request For Information ». RFI), une méthode quantitative qui applique des algorithmes de l'Apprentissage Machine (AM – « Machine Learning ». ML) sur des modèles de la Modélisation des Données du Bâtiment (MDB – « Building Information Modeling ». BIM), et une méthode qualitative qui applique le codage mixte sur le verbatim des entrevues avec les concepteurs et fabricants de composantes de structure en acier. Pour valider ces méthodes, des cas d'études sont réalisés chez un partenaire industriel, leader dans le domaine de la fabrication des composantes de structures d'acier en Amérique du Nord.

Comme résultats, ce travail propose 20 facteurs de fabrication, dont 15 complètement nouveaux dans la littérature, 33 règles de conception, dont 24 sont des règles complètement nouvelles dans la littérature, et 17 initiatives pour une meilleure considération des facteurs de fabrication pendant la conception des composantes de structures d'acier.

Les résultats issus de cette recherche montrent qu'il est possible d'identifier des facteurs de fabrication de structures d'acier et de formuler des règles de conception à travers des analyses des RFIs, des modèles BIM et des entrevues avec les concepteurs et les fabricants de composantes de structures d'acier. Les résultats montrent aussi que les règles de conception formulées dans cette étude sont différentes des règles déjà présentes dans la littérature, et inspirées de l'industrie manufacturière.

En perspective, ce travail propose d'identifier des facteurs de fabrication et de formuler des règles de conception dans d'autres contextes industriels de projet de construction de structures en acier et dans d'autres professions de l'industrie l'AIC. Cette thèse propose aussi d'appliquer les méthodes développées dans cette étude avec d'autres critères de performance comme la transformation, le flux et la valeur, inspirées de la théorie du Transformation Flow Value (TFV), développées par Koskela (2000).

**Mots-clés :** Apprentissage machine ; BIM ; Conception ; Construction ; Entrepreneurs spécialisé ; Entrevues ; Requête pour information,

# **Development of design rules to reduce the fabrication duration of steel structure components**

Mathieu FOKWA SOH

## **ABSTRACT**

In the Architecture, Engineering and Construction (AEC) industry, the failure to integrate the knowledge and experience of specialty contractors (such as fabricators) during the design phase contributes to a lot of waste in terms of quality, cost and construction time. The problem stems from the traditional Design Bid Build (DBB) mode of project delivery, which imposes a linear and fragmented delivery, dictated by plans and specifications, and which does not offer trade contractors the opportunity to participate in the design.

Initiatives such as Value Engineering (VE) and constructability have been proposed to mitigate this problem. While allowing for some knowledge transfer between designers and specialty contractors, these initiatives have focused primarily on reducing the cost and risk of projects. In this way, knowledge transfer is limited and specialized contractors have little opportunity to intervene during design. In a second phase, initiatives have focused on the DBB procurement mode to make it evolve by favouring the integration of manufacturing knowledge in the design phase. However, the proposed solutions do not really question the opportunity to understand and control processes such as fabrication in order to identify constraints to consider for the design. However, in construction projects with steel structures, the fabrication phase of the components represents 30 to 40% of the overall project cost.

In Product Development Engineering (PDE), knowledge transfer is formalized through different design approaches and rules such as Design For Manufacturing and Assembly (DFMA). Through these design rules, the knowledge and experience of manufacturers is available to designers very early in the product development. In this way, designers can anticipate product manufacturing and assembly requirements. An application of design rules in the AEC industry can allow for better integration of knowledge and experience of specialized contractors at the design phase of projects. However, there is very little work proposing the development of design rules for the AEC industry.

This thesis aims to contribute to resolving this problem by proposing rules for construction projects with steel structures that allow designers to consider factors that have a strong impact on the fabrication time of steel structure components.

To achieve this objective, this thesis proposes to identify fabrication factors that will be used later to formulate design rules. Three methods are proposed to identify these factors: a qualitative method that uses open coding on the contents of Requests For Information (RFIs), a quantitative method that applies Machine Learning (ML) algorithms on Building Information

Modeling (BIM) models, and a qualitative method that applies mixed coding on the verbatim of interviews with designers and fabricators of structural steel components. To validate these methods, case studies are conducted at an industrial partner, a leader in the field of structural steel component fabrication in North America.

As result, this work proposes 20 fabrication factors, 15 of which are completely new in the literature, 33 design rules, 24 of which are completely new in the literature, and 17 initiatives for better consideration of fabrication factors during the design of steel structure components.

This research shows that it is possible to identify steel structure fabrication factors and formulate design rules through analyses of RFIs, BIM models, and interviews with steel structure component designers and manufacturers. The results also show that the design rules formulated in this study are different from the rules already present in the literature and inspired by the manufacturing industry.

In perspective, this work proposes to identify fabrication factors and formulate design rules in other industrial contexts of the structural steel construction industry and in other professions of the AIC industry. This thesis also proposes to apply the methods developed in this study with other performance criteria such as transformation, flow, and value, inspired by the TFCV theory developed by Koskela (2000).

**Keywords:** BIM; Construction; Design; Interviews; Machine learning; Specialist contractors; Request for information

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	1
1.1 L'intégration des connaissances et mode de réalisation .....	1
1.2 Constructibilité pour une intégration des connaissances des entrepreneurs spécialisés pendant la conception .....	3
1.3 Le Value Engineering pour une intégration des connaissances des entrepreneurs spécialisés pendant la conception .....	5
1.4 Choix de projets de construction de structures en acier .....	6
1.5 Conception et fabrication des structures en acier .....	7
1.5.1 La conception des structures d'acier .....	7
1.5.2 La fabrication des structures d'acier .....	8
1.6 Considérer la fabrication pour mieux concevoir en construction de structures en acier .....	9
1.7 Les règles de conception pour les projets de construction de structures en acier .....	10
1.7.1 Le DFMA et le « over the wall » .....	10
1.7.2 DFMA dans l'industrie de l'AIC .....	11
1.7.3 Les règles de conception pour l'intégration des connaissances et de l'expérience des fabricants durant la conception des composantes en acier .....	13
1.8 Identification des facteurs de fabrication .....	14
1.8.1 Identification des facteurs de fabrication à partir des RFIs .....	14
1.8.2 BIM pour l'identification des facteurs de fabrication .....	16
1.8.3 Identification des facteurs de fabrication à partir des d'entrevues individuelles et collectives .....	17
1.9 Méthodes pour identifier les facteurs de fabrication .....	18
1.9.1 Apprentissage machine (AM) pour analyser les modèles BIM .....	18

1.9.2	L’analyse qualitative des contenus (AQC) sur des RFIs et le verbatim des entretues .....	19
1.10	Synthèse.....	20
CHAPITRE 2 DÉMARCHE DE TRAVAIL ET ORGANISATION DU DOCUMENT .....		21
2.1	Démarche du travail .....	21
2.2	Choix du contexte industriel.....	22
2.3	Identifier les facteurs de fabrication et formulation des règles de conception .....	24
2.3.1	Article 1: Qualitative analysis of Requests For Information to identify design flaws in steel construction projects .....	24
2.3.2	Article 2: BIM Machine Learning and Design Rules to improve the assembly time in steel construction project .....	24
2.3.3	article 3: A qualitative approach and Design Rules to improve steel construction projects .....	25
CHAPITRE 3 QUALITATIVE ANALYSIS OF REQUESTS FOR INFORMATION TO IDENTIFY DESIGN FLAWS IN STEEL CONSTRUCTION PROJECTS .....		27
3.1	Abstract .....	27
3.2	Introduction .....	28
3.3	The importance of involving contractors’ requirements into the design phase.....	29
3.4	Improve design documents to improve the industry construction process.....	30
3.5	The use of RFIs to improve the quality of the design .....	31
3.6	Methodology .....	32
3.7	Result presentation .....	37
3.7.1	Small projects .....	38
3.7.2	Medium projects .....	41
3.7.3	Large projects .....	43
3.8	Discussions.....	48
3.9	Conclusion.....	50
CHAPITRE 4 BIM MACHINE LEARNING AND DESIGN RULES TO IMPROVE THE ASSEMBLY TIME IN STEEL CONSTRUCTION PROJECTS .....		53

- 4.1 Abstract.....53
- 4.2 Introduction.....54
- 4.3 Literature review.....56
  - 4.3.1 Choice of a knowledge extraction method .....56
  - 4.3.2 Machine learning to identify and extract knowledge .....57
  - 4.3.3 Choice of the type of learning and the type of algorithm.....58
  - 4.3.4 Ensemble learning .....58
  - 4.3.5 Evaluation of prediction quality .....59
  - 4.3.6 BIM for data extraction .....60
  - 4.3.7 BIM is an asset for the success of DFMA in the construction industry .....61
- 4.4 Methodology.....61
- 4.5 Case study .....63
  - 4.5.1 System understandinig .....63
  - 4.5.2 Data understandinig.....65
  - 4.5.3 Data preparation .....65
  - 4.5.4 Modeling .....68
  - 4.5.5 Evaluation.....71
  - 4.5.6 Pattern identification .....75
  - 4.5.7 Knowledge learned and Design Rules.....76
- 4.6 Perspectives .....77
- 4.7 Conclusion .....77

CHAPITRE 5 A QUALITATIVE APPROACH TO IDENTIFY DESIGN GUIDELINES TO REDUCE THE FABRICATION DURATION OF STRUCTURAL STEEL COMPONENTS.....79

- 5.1 Abstract.....79
- 5.2 Introduction.....80
- 5.3 Background.....82
  - 5.3.1 DFMA principles to improve steel construction projects.....82
  - 5.3.2 Design guidelines for steel fabrication processes.....83

5.4	Design of the research .....	86
5.4.1	Industrial Partner.....	87
5.4.2	Semi-structured interviews .....	88
5.4.3	Mixed coding .....	89
5.4.4	Focus group.....	89
5.5	Results .....	89
5.5.1	Results of the semi-structured interviews .....	89
5.5.2	Results of the Focus group.....	91
5.6	Discussion .....	94
5.7	Conclusion.....	96
CHAPITRE 6 DISCUSSION DES RÉSULTATS ET LIMITES DU PROJET .....		99
6.1	Rappel des prémisses.....	99
6.2	Résultats et discussion.....	100
6.3	Limites et perspectives du projet .....	104
CONCLUSION .....		107
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....		109

## LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 3.1	Set of data .....	33
Tableau 3.2	Example of how to group and classify RFIs.....	36
Tableau 3.3	Words most frequent in the set of small project RFIs.....	38
Tableau 3.4	Words most present in the set of medium projects RFIs .....	41
Tableau 3.5	Words most present in the set of large projects RFIs.....	44
Tableau 3.6	The impact of the word connection on the RFIs studied .....	46
Tableau 4.1	Statistical characteristics of the first quarter of data .....	67
Tableau 4.2	Statistical characteristics of the second-quarter of data .....	67
Tableau 4.3	Statistical characteristics of the third-quarter data .....	67
Tableau 4.4	Statistical characteristics of the fourth-quarter data.....	68
Tableau 4.5	Prediction results with GBR .....	68
Tableau 4.6	Prediction results with RFR.....	69
Tableau 4.7	Prediction with Lasso .....	70
Tableau 5.1	Manufacturing guidelines in the literature .....	84
Tableau 5.2	Factors affecting the fabrication duration of steel structures identified in the literature.....	85
Tableau 5.3	Factors identified in this study.....	90

Tableau 5.4	Design guidelines to reduce the duration of fabrication of steel components in the chosen plant.....	91
Tableau 5.5	Initiatives to help address and incorporate fabrication factors during the design phase. ....	93

## LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 0.1	Processus de réalisation d'un projet de construction avec une structure en acier en mode traditionnel DBB .....	2
Figure 0.2	Ventilation des coûts d'une structure de charpente métallique de bâtiment type .....	4
Figure 1.1	Exemples d'une fiche de RFI .....	15
Figure 1.2	Modèle BIM d'une solive en acier .....	16
Figure 2.1	Choix de la méthodologie .....	22
Figure 3.1	Process to identify recurrent words in RFIs.....	37
Figure 3.2	Relationships between the three most frequent words in the RFIs of small projects and the other recurrent words.....	40
Figure 3.3	Relationships between the three most frequent words in the RFIs of medium projects and the other recurrent words.....	42
Figure 3.4	Links between the three most frequent words in the RFIs of large projects .....	45
Figure 4.1	Research Methodology .....	62
Figure 4.2	Joist drawing.....	64
Figure 4.3	Data distribution for the study .....	66
Figure 4.4	GBP comparison of Lasso, RFR, and GBR.....	71
Figure 4.5	Rae comparison of Lasso, RFR, and GBR.....	71

Figure 4.6	Mae Comparison of Lasso, RFR, and GBR .....	72
Figure 4.7	Comparison of prediction models .....	74
Figure 4.8	Feature importance.....	75
Figure 5.1	Research design for the study.....	87

## LISTE DES ACRONYMES

AEC	Architecture, Engineering and Construction
AIC	Architecture, Ingénierie et Construction
AM	Apprentissage Machine
ANN	Artificial Neural Networks
AQC	Analyse Qualitative des Contenus
BIM	Building Information Modeling
CAO	Construction Assistée par Ordinateur
CII	Construction Industry Institute
CM@R	Construction Management at Risk
DB	Design Build
DBB	Design Bid Build
DFMA	Design For Manufacturing and Assembly
DFTFV	Design for Transformation Flow and Value
GBR	Gradient Boosting Regressor
IPD	Integrated Project Delivery
ML	Machine Learning
PDE	Production Development Engineering
QCA	Qualitative Content Analysis
RFR	Random Forest Regressor
RFIs	Request For Informations
TFV	Transformation Flow Value
VE	Value Engineering
GRIDD	Groupe de Recherche d'Intégration et de Développement Durable



## INTRODUCTION

### Problème de recherche

Intégrer les connaissances des entrepreneurs spécialisés pendant la phase de conception est reconnue dans l'industrie de l'Architecture, l'Ingénierie et de la Construction (AIC) comme une initiative importante pour réduire les gaspillages (Song, Mohamed et AbouRizk, 2009 ; Arditi, Elhassan et Toklu, 2002).

Dans l'industrie de l'AIC, le principal mode de réalisation retenu pour les projets est la Conception Contrat, Construction (CCC – « Design Bid Build ». DBB). Ce mode est surtout retenu parce qu'il permet une plus grande concurrence entre les entrepreneurs, et permet aux propriétaires d'obtenir de bas prix et moins de pression politique pendant la sélection des entrepreneurs (Sacks *et al.*, 2018). Dans le mode de réalisation DBB, les opérations sont divisées en tâches séquentielles attribuées à des spécialistes pour leur exécution (Koskela, 1992) : les phases de la conception sont réalisées sans la participation des entrepreneurs spécialisés (Figure 0.1). Pendant cette phase, les concepteurs prescrivent les caractéristiques du bâtiment dans les plans et devis qui sont joints aux appels d'offres. Les entrepreneurs choisis pour réaliser le projet sous-contractent à leur tour les entrepreneurs spécialisés pour réaliser chacune des opérations reliées à la construction.

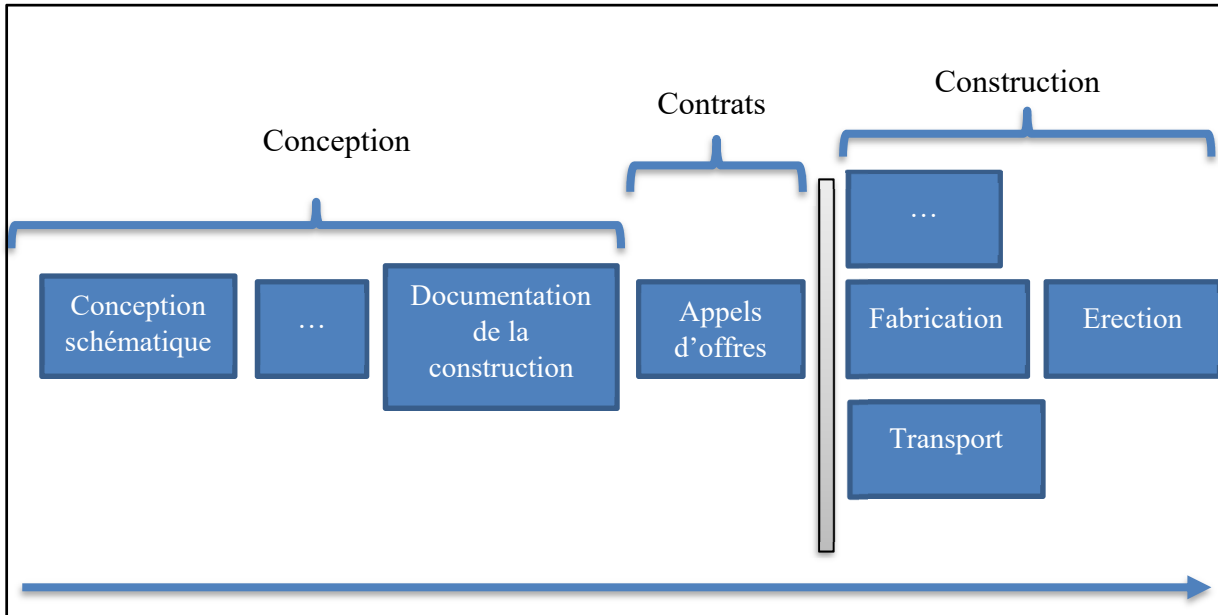


Figure 0.1 Processus de réalisation d'un projet de construction avec une structure en acier en mode traditionnel DBB

À la fin de la conception, les plans, le budget et les délais relatifs au projet permettent des appels d'offres et des signatures des contrats avec les entrepreneurs spécialisés. Ce mode d'approvisionnement impose des séquences de réalisation linéaires et fragmentées caractérisées par une approche prescriptive basée sur la conformité avec les plans et les devis conciliés dans les contrats. Dans ce contexte, les entrepreneurs spécialisés comme les fabricants se retrouvent au bout de la chaîne d'approvisionnement comme tierce partie au niveau contractuel (voir (Figure 0.1)). À ce niveau du cycle de vie du projet, il leur est impossible d'apporter leurs connaissances et expériences à la conception des ouvrages.

Cette situation conduit à plusieurs problèmes génériques (Koskela, 1992 ; Dupagne, 1991) à savoir:

- très peu d'itérations durant le processus de conception;
- les contraintes de relatives aux phases ultérieures ne sont pas considérées dans la conception;

- une grande modification du projet durant la réalisation;
- très peu de retour d'informations et de transparences pour les spécialistes;
- absence de leadership et de responsabilité pour l'ensemble du projet à cause du contrôle segmenté du projet.

La principale conséquence du mode de réalisation DBB est la fragmentation, accentuée par le grand nombre de participants et de spécialistes dans un projet (Forbes et Ahmed, 2010 ; Assaf, Hassanain et Abdallah, 2018 ; Setiawan, Waluyo et Sagara, 2019 ; Egan, 1998). La fragmentation dans les projets de construction se définit comme une forte séparation entre les participants d'un projet de construction, qui entrave l'intégration des connaissances et réduit la possibilité pour les entrepreneurs spécialisés d'influencer les décisions conceptuelles (voir Figure 1.1) (Mohd Nawi, Baluch et Bahauddin, 2014).

Les projets de construction dont la structure est en acier sont parmi les projets qui subissent le plus les conséquences de la fragmentation (Robinson, 2007). Dans les projets de construction avec des structures d'acier, la fragmentation se manifeste principalement entre les phases de conception et les phases de fabrication (Carter et Schlafly, 2008 ; Yang et Chan, 2018). La fragmentation se caractérise par une prompte séparation des contrats, des étapes et des responsabilités entre les concepteurs et les fabricants de structures d'acier. Cette séparation contribue à altérer l'intégration des connaissances et à réduire l'opportunité pour les fabricants de participer aux décisions conceptuelles (Song, Mohamed et AbouRizk, 2009).

La Figure 0.2 représente la ventilation des coûts de construction dans un projet de construction d'une structure de charpente métallique de bâtiment type. La phase de fabrication représente de 30 à 40 % du coût global du bâtiment et la phase de conception 2% (Carter et Schlafly, 2008 ; Anitha, Santhiya et BIST, 2018). Pourtant les décisions prises durant la phase de conception affectent jusqu'à 88% du coût et de la durée de ces projets (Evers et Maatje, 2000).

Le processus de conception concerne le développement du concept structurel, le calcul de stabilité et le choix des profilés (Hayward, Weare et Oakhill, 2008). Chacune de ces étapes est faite avec le souci pour les concepteurs de respecter les normes, et de satisfaire le client (esthétiques et budget) (Schmidt *et al.*, 2018 ; Heinisuo, Laasonen et Haapio, 2010), souvent

au détriment des alternatives de construction visant à réduire le coût et la durée des projets (Barg, Flager et Fischer, 2017). Les opérations de fabrication concernent les étapes d'usinage (coupe, perçage, meulage, etc.) et d'assemblage (boulonnage, soudage, pointage, etc.) (Bangash, 2000). Les concepteurs n'ont généralement peu ou pas de connaissances et d'expérience sur les opérations de fabrication de structures d'acier. Les décisions qu'ils vont prendre peuvent ne pas considérer les facteurs de fabrication (Haapio, 2012 ; Pavlovčič, Krajnc et Beg, 2004 ; Watson *et al.*, 1996). Le résultat de ce processus est un produit conçu, inadapté à la phase de fabrication, qui va générer des pertes de temps et d'argent, participant à une baisse de la productivité de l'industrie de l'AIC (Forgues *et al.*, 2012).

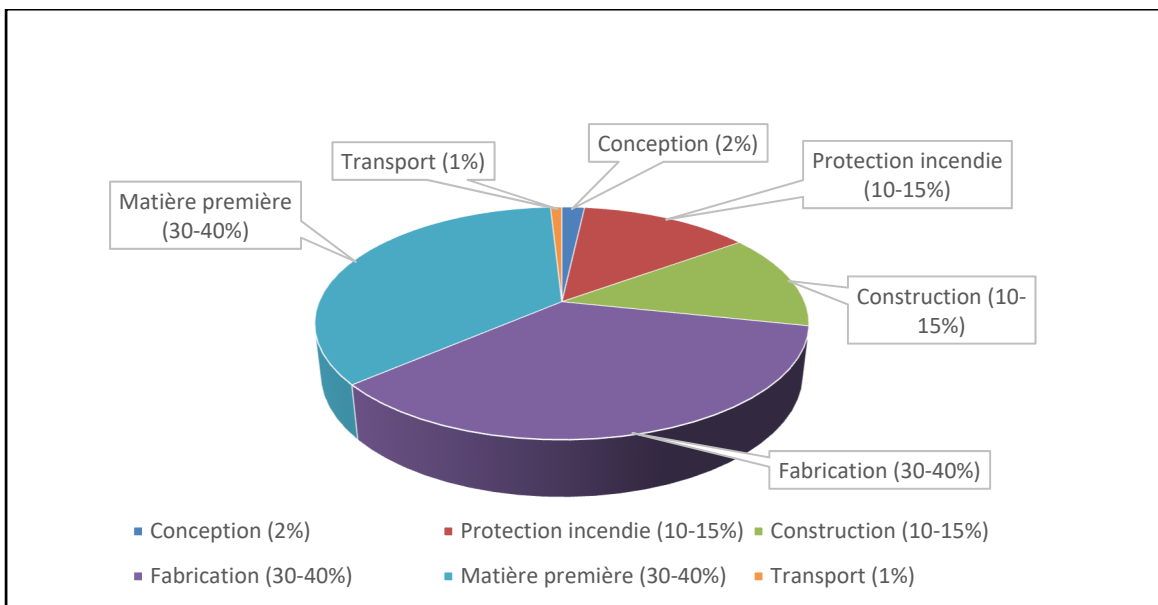


Figure 0.2 Ventilation des coûts d'une structure de charpente métallique de bâtiment type  
Adaptée de Anitha, Santhiya et Bist (2018)(Anitha, Santhiya et BIST, 2018)

Des initiatives ont été proposées pour réduire la fragmentation entre concepteurs et entrepreneurs spécialisés de l'industrie de l'AIC. Il s'agit principalement de l'analyse de constructibilité et du Value Engineering (VE).

L'Institut de l'Industrie de la construction (IIC – « Construction Industry Institute ». CII) définit la constructibilité comme une intégration et une utilisation des connaissances de construction dans la planification, la conception, l'approvisionnement et les opérations sur site,

dans l'intention d'atteindre les objectifs du projet et d'améliorer la performance du bâtiment (Ruby, 2008). Le VE est une analyse approfondie de la conception d'un bâtiment par les spécialistes du domaine et des économistes du coût, pour une optimisation économique et de temps des projets (Araszkiewicz, 2020). La constructibilité et le VE prônent un certain transfert de connaissances par la participation des entrepreneurs et des spécialistes du coût à la phase de conception. Cependant, ces initiatives interviennent à la fin de la conception quand tout est cristallisé, ce qui entraîne une perte de temps et une augmentation des coûts de projets. De plus, le transfert de connaissance dans la constructibilité et le VE demeure limité, car ces initiatives sont plus concentrées sur la réduction du coût et des risques liés aux projets. Ces initiatives impliquent rarement la participation du fabricant à la phase de conception.

Des initiatives pour mitiger les conséquences du mode de réalisation DBB proposent également de faire évoluer le mode d'approvisionnement de façon à permettre une meilleure implication des responsabilités des entrepreneurs et des concepteurs dans les contrats, à travers le mode de Réalisation des Projets Intégrés (RPI – « Integrated Project Delivery ». IPD). Ce mode de réalisation est très rarement utilisé dans les projets à cause de la résistance aux changements, la différence de cultures entre concepteurs et entrepreneurs, et les gaspillages liés à la forte présence des professionnels pendant la conception (Deutsch, 2011). Aussi, dans ces initiatives, on ne se questionne pas vraiment sur l'opportunité de comprendre et de maîtriser les processus de fabrication pour considérer ces contraintes pendant la conception des ouvrages.

Depuis trois décennies l'industrie de l'AIC s'inspire de l'industrie du PDE pour améliorer sa productivité. En effet les initiatives constructibilité, VE ainsi que d'autres sont inspirées de l'industrie de PDE (Koskela, 2000 ; Anumba, Kamara et Cutting-Decelle, 2006). Il y a donc une opportunité de s'inspirer également des initiatives en PDE pour faire évoluer ces initiatives en proposant une méthode qui permet de considérer les connaissances des entrepreneurs spécialisés pendant le déroulement de la phase de conception.

## **Design for Manufacturing and Assembly**

Dans le Product Development Engineering (PDE) la collaboration entre concepteurs et fabricants est clairement établie et formalisée à travers différentes méthodes et règles de conception telle que le Design For Manufacturing and Assembly (DFMA) (Boothroyd, 1994). Ces règles permettent aux concepteurs de considérer, pendant la phase de conception, les particularités des phases en aval des projets sans nécessairement solliciter la présence des fabricants pendant la phase de conception (Staub-French *et al.*, 2018 ; Alfieri *et al.*, 2020). De cette façon, les fabricants participent à la réduction du coût et du temps des projets pendant la conception, tout en augmentant la qualité du produit final (da Silva *et al.*, 2014). Un cas d'étude réalisé à Douglas Commercial Aircraft présente les gains potentiels que peuvent apporter les règles de conception dans un processus de construction d'avion : 51% de réduction du nombre de pièces, 37% de réduction du coût de fabrication, 62% de réduction du temps d'assemblage, 57% de réduction du temps de fabrication (Ashley, 1995).

Proposer des règles de conception dans l'industrie de l'AIC en général et plus particulièrement à des projets de construction avec des structures en acier peut permettre une meilleure considération des facteurs de fabrication, et contribuer de façon significative, à la réduction des gaspillages. Cependant, la mise en place des règles de conception du type DFMA requiert d'identifier des facteurs de fabrication qui ont un impact sur le coût ou la durée de fabrication des composantes d'acier.

### **Facteurs de fabrication**

Un facteur est tout ce qui peut permettre ou empêcher à une organisation ou à un procédé d'atteindre ses objectifs (Goldratt, 1990). Les facteurs de fabrication sont les caractéristiques du produit ou de l'unité de fabrication, à considérer pour une fabrication effective, selon un critère donné (coût ou durée).

La première prémisse sur laquelle se fonde cette thèse est qu'à l'instar de l'industrie du PDE, il est possible d'identifier des facteurs impactant la fabrication, et de formuler des règles de conception fondée sur ces facteurs, pour réduire la durée de fabrication des composantes de structures d'acier.

## **Question et objectif de la recherche**

La formulation du problème de recherche que soulève cette thèse suscite la question suivante :

Quels seraient les facteurs impactant la fabrication, et les règles de conception fondées sur ces facteurs, pour réduire la durée de fabrication des composantes de structures d'acier ?

L'objectif de ce projet de thèse est de formuler des règles de conception pour réduire la durée de fabrication des composantes de structures d'acier.

La formulation des règles de conception requiert l'identification des facteurs de fabrication. Pour y arriver, il est proposé :

- d'identifier des facteurs de fabrication à partir des RFIs Requête Pour Information (RPI - « Request For Information. RFI»);
- d'identifier les facteurs de fabrication à partir des modèles BIM des structures d'acier;
- d'identifier les facteurs de fabrication à l'aide d'entrevues effectuées avec les concepteurs et les fabricants de structures d'acier.

Dans l'industrie du PDE, le coût est considéré comme critère de performance du DFMA parce qu'il permet de répartir le coût d'outillage dans l'ensemble des unités produites. Cependant, dans l'industrie de l'AIC, les coûts de fabrication peuvent varier en fonction de plusieurs critères subjectifs tels que le salaire minimal aux lieux de fabrication des ouvrages, les horaires de travail syndiqués etc. La durée des opérations de fabrication des ouvrages reste toutefois relativement la même quel qu'en soit le lieu de fabrication. C'est pourquoi dans cette thèse, c'est la durée de fabrication qui est considérée comme critère de performance.

## **Structure de la recherche**

Cette thèse est organisée comme suit :

Le premier chapitre présente le contexte théorique et industriel dans lequel ces travaux s'inscrivent. Il contient la justification du choix de projets de construction de structures en acier comme contexte d'implémentation de ces travaux. Il inclut également l'importance que la phase de conception et la collaboration peuvent occuper dans la réduction des durées des opérations dans l'industrie de l'AIC.

Le chapitre deux contient la méthodologie adoptée qui s'appuie sur une méthode mixte : une approche quantitative et une approche qualitative qui permet une triangulation des données provenant de trois sources : l'analyse des RFIs auprès des concepteurs venant des fabricants, l'analyse des modèles de conception et de fabrication et des entrevues auprès des concepteurs et des fabricants.

Les chapitres trois, quatre et cinq contiennent les trois articles scientifiques qui constituent cette thèse. Ces trois chapitres présentent trois perspectives pour identifier les facteurs de fabrication dans un contexte de projets de construction de structures en acier. Le chapitre trois identifie des facteurs de fabrication à partir des RFIs. Le chapitre quatre identifie les facteurs de fabrication à partir des modèles BIM, et le chapitre cinq identifie les facteurs de fabrication à partir des entrevues. Dans chacun de ces chapitres, un cas d'étude permet de valider la méthode proposée. En outre, dans le chapitre cinq, des règles de conception et des initiatives pour les considérer sont proposées.

Le chapitre six contient une discussion générale des résultats obtenus.

La conclusion rappelle les objectifs, présente les contributions apportées ainsi que les perspectives de travaux futurs.

## CHAPITRE 1

### REVUE DE LA LITTÉRATURE

Dans ce chapitre, le problème d'intégration des connaissances des entrepreneurs spécialisés pendant la conception est décrit. Des initiatives apportées pour résoudre ce problème sont présentées. Ce chapitre propose également de participer à la résolution du problème en proposant l'utilisation des règles de conception telles que développées dans l'industrie du PDE pour faciliter l'intégration des connaissances des entrepreneurs spécialisés. Proposer les règles de conception requiert d'identifier les facteurs de fabrication. Ceci peut se faire soit au travers des données disponibles, soit avec la participation des entrepreneurs spécialisés. Ce chapitre présente les opportunités d'identifier des facteurs de fabrication dans un contexte industriel donné.

#### 1.1 L'intégration des connaissances et mode de réalisation

La fragmentation est définie comme une séparation (Abadi, 2005) et comme une forte implication de spécialisations et de processus dans un projet de construction (Mohd Nawi, Baluch et Bahauddin, 2014). La fragmentation provient du mode de réalisation traditionnel des projets DBB et de la croissance de la complexité des bâtiments qui favorisent une réalisation séquentielle et fragmentée des projets de construction (Egan, 1998).

La fragmentation provient de la nature traditionnelle du mode de réalisation des projets. Un mode de réalisation de projet est un modèle d'entreprise qui décrit comment les ressources sont combinées et transformées afin de générer de la valeur pour les clients et autres parties prenantes (Magretta, 2002). Il y'a deux grands types de mode de réalisation : les modes transactionnels, séquentiels avec transferts d'obligations, de responsabilités et de risques dont le DBB, la Conception et Construction (CC – « Design Build ».DB) et le Gestionnaire de Construction à Risque (GCR – « Construction Management at Risk ». CM). Puis il y'a les modes relationnels, plus collaboratifs avec partage des responsabilités et des risques (les différentes formes du IPD)

Le DBB est un mode de réalisation, où le client recrute un concepteur (ou architecte) pour développer les requis de construction, établir la conception schématique, le développement de la conception et les documents contractuels. Les documents contractuels doivent avoir tous les détails requis pour permettre aux clients de recruter des entrepreneurs qui bâtiront son édifice tel que conçu (Eastman *et al.*, 2011) conformément aux plans, coût et délais contenus dans les documents de soumission. Les entrepreneurs spécialisés choisis dans ce contexte n'ont à aucun moment l'occasion de proposer leurs connaissances et leur expérience pour une meilleure prise en compte des facteurs relatifs aux phases de réalisation.

Le CM est un mode de réalisation des projets qui se distingue du DBB par le fait qu'ici le client engage un gérant de construction qui va agir comme entrepreneur. C'est ce gérant qui va proposer le découpage des projets en lots, recruter les professionnels pour la préparation des documents d'appels d'offres, et attribuer les différentes tâches aux différents entrepreneurs spécialisés. Le gérant de projet de construction qui assume le rôle d'assurer la constructibilité du projet avant son lancement.

Le DB est un mode de réalisation de projets qui se distingue du DBB et du CM. Ce mode de réalisation est proposé pour consolider les responsabilités des concepteurs et des entrepreneurs dans un seul contrat (Sacks *et al.*, 2018). Dans ce contexte, les concepteurs et les entrepreneurs constituent l'équipe qui va travailler en collaboration pour réaliser le projet. Dans la pratique, dans la plupart du temps, c'est l'entrepreneur qui signe le contrat et engage un concepteur pour assurer les services de conception au même titre que les sous-traitants.

L'institut Américain d'Architecture (IAA – « American Institute of Architecture ». AIA) définit le IPD comme une approche de réalisation de projet qui intègre les personnes, les systèmes, les structures et les pratiques d'entreprise dans un processus qui exploite les talents et les connaissances de tous les participants afin d'optimiser les résultats du projet, d'augmenter la valeur pour le propriétaire, de réduire le gaspillage et de maximiser l'efficacité à travers toutes les phases de conception de construction (Guide, 2007). Dans ce type de contrat, les risques et les récompenses sont partagés et le succès des parties prenantes dépend du succès du projet.

Les modes de réalisation transactionnels et relationnels sont centrés sur le contrôle des coûts et la gestion des risques. Les solutions proposées ne se questionnent pas véritablement sur l'opportunité de considérer les contraintes liées au processus de fabrication dans le but de les considérer pendant la conception.

D'autre part, des initiatives comme l'analyse de constructibilité et le VE sont également proposés pour réduire l'impact du mode de réalisation traditionnel DBB dans les projets de construction.

## **1.2 Constructibilité pour une intégration des connaissances des entrepreneurs spécialisés pendant la conception**

La constructibilité s'applique dans tous les contextes de réalisation de projet, où il y'a une séparation entre la conception, la planification, l'approvisionnement et la réalisation du projet (Othman et Ahmed, 2011). La constructibilité se caractérise par une collaboration des concepteurs entrepreneurs pour visualiser le projet à travers une maquette numérique (BIM) et anticiper sur les coûts et les risques liés aux projets (Ruby, 2008).

Quatre principes régissent la constructibilité dans les projets à savoir ((CII), 1993):

- les équipes concepteurs et entrepreneurs doivent partager leurs connaissances et expériences au bénéfice du projet;
- l'objectif principal et commun est la réduction du coût et des risques du projet;
- l'implication des entrepreneurs pendant la conception est faite pour mieux comprendre la planification du projet;
- l'échange des informations entre entrepreneurs et concepteurs doit se faire dans les deux directions concepteurs constructeurs et constructeurs vers concepteurs.

La constructibilité s'applique aussi dans les projets de construction à structures en acier, où la conception est séparée des phases d'approvisionnement, de fabrication et d'érection. Afin de réduire les effets du mode traditionnel, la constructibilité propose dans de nombreux cas de permettre une collaboration entre les concepteurs de structures d'acier, des entrepreneurs

fabricants et érecteurs, des ingénieurs de connexion et autres ingénieurs indépendants pendant la phase de conception.

Cependant, il est difficile d'appliquer les principes de la constructibilité. En effet, même si les entreprises acceptent de partager des connaissances et leur expérience au bénéfice du projet, il n'est pas possible de vérifier si les modifications proposées par les entrepreneurs sont au bénéfice du projet ou pour leur propre bénéfice. Certaines entreprises pourront profiter de ces séances d'échanges pour privilégier des prises de décisions relatives à leur intérêt plutôt qu'à l'intérêt global du projet.

Aussi, la constructibilité peut se heurter à des difficultés liées à collaboration interdisciplinaire. En effet, regrouper entrepreneurs spécialisés et des concepteurs très tôt dans la phase de conception peut rapidement alourdir les coûts des projets et peut aussi aboutir à des disputes interminables liées à la perception de tout un chacun, et à la volonté des entreprises de favoriser les prises de décisions correspondants à leurs besoins spécifiques (Lawson, 2006 ; Elvin, 2007).

La constructibilité peut également être difficilement applicable dans les projets de construction à structures en acier. Car ce type de projet est complexe (Robinson, 2007). Considérer simultanément toutes les étapes d'approvisionnement, de fabrication, d'érection et autres durant la conception peut déboucher sur de longues séances de travail, de nombreuses modifications du produit conçu et aboutir à des projets très coûteux et très longs.

Identifier les facteurs qui caractérisent les critères de performance recherchés, et formuler des règles de conception, plutôt que d'avoir recours à la participation des entrepreneurs spécialisés peut permettre aux concepteurs d'intégrer des connaissances des entrepreneurs spécialisés durant la conception sans avoir recours à leur présence.

Une autre initiative est proposée dans l'industrie de l'AIC pour réduire les effets du mode de réalisation traditionnel des projets. Il s'agit du Value Engineering.

### **1.3 Le Value Engineering pour une intégration des connaissances des entrepreneurs spécialisés pendant la conception**

Le VE est une analyse interdisciplinaire (concepteurs, ingénieurs et analystes de coûts) réalisée pour ajouter de la valeur au produit par la modification de sa conception (Miles, 1961). La valeur est définie dans le VE comme le rapport entre les bénéfices et le coût du produit. L'objectif du VE est de réduire ou éliminer le coût du produit en maintenant ou améliorant les fonctionnalités et la qualité du produit (Araszkiewicz, 2020 ; Cooper et Slagmulder, 2017 ; Miles, 1961). La fonctionnalité est définie comme ce dont le produit est destiné à servir.

Le VE se réalise à la fin de la conception du produit. Il implique : l'identification et l'évaluation des fonctionnalités du produit, la proposition et l'évaluation des alternatives, le choix et le développement de l'alternative retenue (Cooper et Slagmulder, 2017).

Dans l'industrie de l'AIC, le VE consiste à modifier la conception par une analyse approfondie des fonctionnalités d'un bâtiment par les experts en coûts, pour une optimisation économique (Araszkiewicz, 2020). Le VE prend de plus en plus de la valeur auprès des entreprises de construction surtout à cause de la hausse des coûts de matières premières qui engendre augmentation des coûts de construction. Le VE va permettre d'analyser toutes les possibilités et de réduire les dépenses inutiles dans les décisions conceptuelles, de façon à parvenir à un produit conçu à moindre coût, mais qui respecte les besoins du client (Cooper et Slagmulder, 2017 ; Dell'Isola, 1997).

Dans les projets de construction de structures en acier, l'amélioration des projets sur la base du VE concerne : la simplification de la conception, la standardisation, la préfabrication des éléments structurels et l'analyse des disponibilités (Araszkiewicz, 2020). Cependant, dans le VE les analyses d'amélioration se font à la fin de la conception. Ceci peut être un sérieux handicap parce qu'à ce stade, les décisions d'amélioration prises durant le VE vont requérir la reprise d'une partie ou de la totalité de la conception. Ceci peut facilement aboutir à des projets longs et très coûteux. Aussi, les experts qui participent au VE sont des spécialistes du coût. Ils peuvent avoir des connaissances limitées des opérations liées à la construction du bâtiment.

La constructibilité et le VE sont des initiatives qui ont une certaine incidence dans l'intégration des connaissances et des expériences des entrepreneurs dans la phase de conception. Cependant, une trop grande intégration des entrepreneurs peut nuire au travail des concepteurs (Lawson, 2006).

Les connaissances et l'expérience des entrepreneurs peuvent être exprimées sous forme de règles de conception, destinées à améliorer un critère spécifique des opérations du cycle de vie du projet. Pour ce faire, ce travail de thèse se propose d'identifier dans les projets de construction de structures en acier, des facteurs de fabrication visant à réduire la durée des projets, et de suggérer des règles de conception destinées à réduire la durée de fabrication des composantes de structures d'acier.

#### **1.4 Choix de projets de construction de structures en acier**

Pour les professionnels de l'industrie de l'AIC, construire en acier représente une alternative sérieuse face au béton et au bois comme matériaux de structures, à cause de son efficacité et sa durabilité (Hayward, Weare et Oakhill, 2008). En effet, en tant que matériau,

- l'acier a des propriétés mécaniques qui font de lui le matériau durable par excellence dans l'industrie de l'AIC, (Hayward, Weare et Oakhill, 2008);
- le rapport résistance/poids de l'acier favorise la création des bâtiments complexes et modernes, où il fait bon vivre (Charbrolin, 1992);
- l'acier utilisé dans la construction des bâtiments peut être entièrement recyclable et réutilisable (Sansom, 2003);
- l'acier est fabriqué à partir du fer, qui est un matériau pas coûteux et abondant (le 4<sup>e</sup> élément le plus important sur la terre (Cameron, 1973));
- le recyclage de l'acier ne réduit pas ses propriétés mécaniques et physiques (Sansom, 2003).

La construction de structures en acier est pionnière de l'industrie de l'AIC dans l'intégration des outils de la Conception assistée par ordinateur (CAO), et de la Fabrication assistée par ordinateur (FAO) (Robinson, 2007). Les structures en acier peuvent être préfabriquées dans

un environnement contrôlé avec des machines certifiées qui offrent une qualité cohérente des produits usinés (Alshamrani, 2017).

C'est à cause de ces nombreux avantages que les structures en acier gagnent en popularité dans l'industrie de l'AIC (Silva et Mercier, 2020). En 2018, 43 % de la production mondiale d'acier était destinée à l'industrie de la construction (Edzarenski, 2018). On prévoit le double de la demande actuelle en acier pour l'industrie de la construction en 2045 (Moynihan et Allwood, 2014).

Cependant contrairement au béton qui se met en forme facilement, la phase de fabrication des structures d'acier requiert des opérations de fabrication et d'assemblage qui devraient être considérées dès la phase de conception.

## **1.5 Conception et fabrication des structures en acier**

### **1.5.1 La conception des structures d'acier**

La conception est une phase qui consiste à choisir les éléments de structures d'acier de façon à garantir la stabilité de l'ouvrage dans ses conditions de fonctionnement (Tamboli, 1999).

Pendant la conception, pour choisir les profilés de l'ouvrage à utiliser, les concepteurs appliquent des chargements et des conditions aux limites conformément aux standards en vigueur du site qui hébergera l'ouvrage. En fonction du coefficient de sécurité correspondant à l'élément de l'ouvrage calculé, les ingénieurs vont obtenir les limites utiles à considérer pour une meilleure stabilité de l'ouvrage. Cette limite va aider aux choix des types de profilés à attribuer aux composantes de structures d'acier (poteaux, poutres, etc.) qui constituent le bâtiment. La limite ultime calculée va aussi orienter les concepteurs sur le choix du type de connexion à considérer pour l'ouvrage (Toole, Hervol et Hallowell, 2007).

Si les concepteurs ne connaissent pas les facteurs de fabrication, ils vont opérer des choix de conception qui vont imposer les types et les longueurs de profilés, et les types de connexion qui imposent des opérations d'usinage et d'assemblage sans nécessairement considérer la

réalité de la phase de fabrication et d'assemblage. Cette situation va contribuer à l'augmentation des RFIs, et à la présence de nombreux gaspillages pouvant augmenter la durée et le coût de la phase de fabrication.

Les projets de construction en acier contiennent de nombreuses pièces ayant toutes des particularités techniques différentes. Le BIM permet une meilleure gestion de ces grandes quantités d'information pendant la réalisation des projets de construction (Robinson, 2007). Ces informations concernent la géométrie, les relations spatiales, les propriétés physiques et mécaniques et les quantités des composantes (Crotty, 2012). Le BIM peut également intégrer des renseignements essentiels pour les opérations qui constituent le cycle de vie des composantes de structures d'acier. Ces informations peuvent être : les masses des éléments, les sens d'orientation, les surfaces usinées, les types de finitions et de revêtement, les points de fixation, etc. Toutes ces informations, qui sont les résultats des décisions conceptuelles, peuvent être exploitées, afin d'identifier leur impact sur les performances des phases en aval du cycle de vie des projets de construction de structures en acier.

### **1.5.2 La fabrication des structures d'acier**

La phase de fabrication des structures d'acier compte les opérations d'usinage et d'assemblage des composantes (BCSA, 2003). Les opérations d'usinage concernent la coupe, le meulage, le perçage l'ajustage, le carottage, etc. Les opérations d'assemblage concernent principalement le soudage et le boulonnage. Ce sont les décisions conceptuelles qui influencent la durée de chacune de ces opérations d'usinage et d'assemblage.

Plusieurs machines et dispositifs peuvent être utilisés pour la fabrication des structures d'acier. Dans des usines de fabrication, il est de plus en plus fréquent d'identifier des machines d'usinage par commande numérique (CNC) qui proposent des opérations précises sans intervention humaine. Les machines CNC ne réalisent pas toutes les opérations d'usinage et d'assemblage. Pourtant les concepteurs ne disposent pas toujours des informations relatives aux limites des machines CNC présentes chez le fabricant qui va réaliser le projet.

Dans les usines de fabrication de composantes de structures d'acier, on retrouve très souvent des tables d'usinage et d'assemblages adaptées, qui sont généralement montées par des

opérateurs pour faciliter certaines opérations complexes ou simplement répétitives. Toutes ces informations qui peuvent pourtant influencer la durée et le coût des projets ne sont presque jamais disponibles chez les concepteurs. C'est la raison pour laquelle, dans les projets de construction en acier, les fabricants de structures d'acier font face à des difficultés de fabrication liées à des décisions conceptuelles (Papajohn *et al.*, 2018).

### **1.6 Considérer la fabrication pour mieux concevoir en construction de structures en acier**

La collaboration entre les fabricants et les concepteurs pendant la conception des ouvrages en structures en acier est essentielle pour considérer les facteurs de fabrication. Cependant, dans la construction de structures en acier, les projets sont réalisés très souvent sur le mode DBB, les phases de conception et les phases de fabrication font rarement partie d'une même entreprise; concepteurs et fabricants ne partagent pas toujours les mêmes intérêts. Dans la plupart du temps, les entreprises sont recrutées sur la base du plus bas soumissionnaire (Bangash, 2000). Réunir concepteurs et fabricants de structures d'acier dans une collaboration interdisciplinaire peut aboutir à des projets très onéreux, et rapidement virer à des discussions interminables, où chacun des participants défend ses intérêts. De plus, les décisions prises collectivement ne seront pas assumées par de tierces parties.

Cependant, les concepteurs et les fabricants de structures d'acier sont conscients de la nécessité d'une intégration des connaissances et d'expérience de fabricants dès la phase de conception des ouvrages en acier. Il serait donc possible de les faire collaborer dans le cadre d'une étude scientifique plutôt que dans le cadre d'un projet, afin d'identifier les facteurs de fabrication et des règles de conception. Ces règles pourraient constituer un pas important dans l'intégration des connaissances des fabricants de structures d'acier dans la phase de conception. Dans l'industrie du PDE, cette initiative a permis la mise en place des règles de conception.

## **1.7 Les règles de conception pour les projets de construction de structures en acier**

### **1.7.1 Le DFMA et le « over the wall »**

Les règles de conception ou lignes directrices sont une série de propositions qui peuvent permettre aux concepteurs d'atteindre un ou plusieurs objectifs connus au travers de la phase de conception (Filippi et Cristofolini, 2009). L'objectif visé peut être la sécurité, la réduction de temps de fabrication etc. Quand l'objectif visé par les règles de conception concernent la sécurité des occupants par la stabilité de l'ouvrage à concevoir, elles sont enchassées dans le Code de construction et elles ont un caractère prescriptif.

Les règles de conception peuvent être seulement des recommandations. Dans ce cas, elles sont formulées et proposées aux concepteurs qui peuvent ou pas les prendre en considération. Comme exemple, « Utiliser si possible le même type de boulon dans les assemblage ».

Dans la littérature, on rencontre les termes Design for X, X désignant l'objectif à atteindre, règles de conception (« Design Rules »), ou encore lignes directrices (« Design Guidelines »). Tous ces termes dans ce document de thèse font référence aux règles de conception et sont considérés comme synonymes.

Parmi les règles de conception les plus utilisées dans l'industrie du PDE, on y trouve le DFMA ou « Design for Manufacturing and Assembly ».

Le DFMA est utilisé dans l'industrie du PDE pour intégrer les connaissances manufacturières dans la phase de conception des composantes (Harik et Sahmrani, 2010). Le DFMA est la combinaison de deux disciplines à savoir, le Design for Manufacturing (DFM), dont le principe consiste à considérer les contraintes de fabrication, et le Design for Assembly (DFA) dont le principe consiste à réduire les contraintes d'assemblage durant la conception des pièces (Bogue, 2012).

Le DFMA est utilisé dans l'industrie du PDE comme solution face aux gaspillages provoqués par le processus traditionnel de conception et de fabrication « over the wall » (Gao, Low et Nair, 2018 ; Boothroyd, 1994). Le processus traditionnel « over the wall » consistait à

considérer la conception et la fabrication des pièces comme étant des phases indépendantes, consécutives et isolées. De cette façon, les fabricants n'interagissaient pas avec les concepteurs, ce qui débouchait sur les gaspillages et des pertes de qualités des pièces.

Pour apporter une solution à cette situation, les concepteurs et les fabricants de l'industrie du PDE ont proposé des analyses de fabrication des pièces conçues de façon itérative pour favoriser une meilleure intégration des connaissances des fabricants durant la conception. Progressivement, les analyses itératives ont laissé place à l'ingénierie concourant, qui consiste à faire participer plusieurs disciplines durant la phase de conception afin d'anticiper sur les contraintes en aval des projets. De l'ingénierie concourante découlera des règles de conception telles que le DFMA (Harik et Sahmrani, 2010).

Les effets du processus traditionnel de conception et de fabrication des pièces « over the wall » s'identifient beaucoup aux gaspillages que DBB impose à l'industrie de l'AIC aujourd'hui. Les initiatives telles que la constructibilité et le VE initiés dans les projets de construction de structures en acier s'assimilent aussi aux initiatives d'analyse de fabrication et de l'ingénierie concourante qui ont été initiées pour éviter les effets du « over the wall » dans l'industrie du PDE. Une prochaine alternative pour une meilleure intégration des connaissances et de l'expérience des fabricants pourrait être la mise en place des règles de conception similaires à ce qui a été fait dans l'industrie du PDE.

### **1.7.2 DFMA dans l'industrie de l'AIC**

Le DFMA prend de plus en plus de place dans l'industrie de l'AIC. En effet, de grandes firmes de construction européennes, chinoises et nord-américaines ont démontré à travers des cas d'étude que l'application du DFMA dans des projets de construction apporte plus de durabilité, réduit l'impact environnemental des projets et surtout réduit considérablement la durée des opérations de construction (McFarlane et Stehle, 2014). Aussi, le gouvernement du Royaume-Uni, de Singapour de Hong Kong et tout récemment de l'Italie, encourage des entreprises de construction à intégrer l'utilisation du DFMA, par la mise en place de plan et guide

d'intégration du DFMA dans les projets de construction (Gao, Low et Nair, 2018 ; Sinclair, 2019 ; Alfieri *et al.*, 2020).

Dans l'industrie du PDE, la conception et la fabrication sont des phases clairement identifiées. Dans l'industrie de l'AIC, les opérations d'architecture et d'ingénierie sont considérées comme des étapes de conception et toutes les autres opérations réalisées après la phase de conception sont considérées comme des étapes de la construction (Lu *et al.*, 2020). L'intégration du DFMA dans les projets de construction consiste à considérer pendant la conception, les connaissances et l'expérience provenant des professionnels de la construction.

Cependant, dans l'industrie de l'AIC, appliquer le DFMA se confond très souvent à la construction modulaire (McFarlane et Stehle, 2014). La construction modulaire est une façon de construire basée sur les unités fabriquées en usine qui sont installées et connectées sur le site pour créer des bâtiments fonctionnels (Lawson, Ogden et Goodier, 2014). Le DFMA consiste à proposer un processus de conception systématique qui intègre l'expérience et les connaissances des activités en aval de la conception (Boothroyd et Alting, 1992 ; Kuo, Huang et Zhang, 2001 ; Ashley, 1995). Bien que le DFMA est indispensable à la construction modulaire, le DFMA ne saurait se résumer en une construction modulaire.

Aussi, appliquer le DFMA dans l'industrie de l'AIC se résume bien souvent à considérer les règles de conception définies dans l'industrie du PDE, sans considérer ses limites dans le domaine de la construction. En effet, Banks et al. (2018), Kim et al. (2016) Gbadamosi et al. (2019) proposent des règles de conception calquées sur celles de l'industrie du PDE pour la réalisation des projets de construction dont la charpente est en acier. Ces règles sont toutefois proposées sans prendre en considération les particularités de l'industrie de l'AIC, notamment l'unicité des projets, les enjeux de la logistique, la production sur site, etc. Une telle application du DFMA peut être inappropriée pour intégrer les connaissances des entrepreneurs spécialisés pendant la conception, et réduire la durée des projets.

Une alternative aux limites citées ci-dessus consiste à développer des règles de conception destinées à réduire un critère particulier de l'industrie de la construction.

### **1.7.3 Les règles de conception pour l'intégration des connaissances et de l'expérience des fabricants durant la conception des composantes en acier**

Il y'a trois façons d'appliquer le DFMA (Bogue, 2012). La première façon consiste à proposer une série de règles de conception pour minimiser un critère de performance spécifique comme le coût ou la durée de fabrication. La deuxième, qui est suggérée par Boothroyd (1992), consiste à proposer des évaluations quantitatives des options de conception. Toutes les pièces du produit sont évaluées conformément aux difficultés que l'on peut rencontrer durant les phases de fabrication et d'assemblage. La troisième méthode est la plus récente, elle consiste à automatiser le processus d'évaluation en utilisant les logiciels informatiques. De cette façon, le logiciel analyse le produit conçu, applique tour à tour les règles de conception et retient les combinaisons de conception qui proposent des meilleurs résultats (Bogue, 2012).

Il peut être difficile d'appliquer les méthodes 2 et 3 dans les projets de construction de structures en acier, parce qu'elles s'appliquent sur chaque composante, au fur et à mesure où la conception détaillée avance. Avant de mettre en œuvre les méthodes 2 et 3, il faut commencer par formuler les règles et en mesurer l'impact. La première méthode semble la plus convenable étant donné l'état d'avancement faible des connaissances sur le DFMA dans l'industrie de l'AIC.

Développer des règles de conception pour des produits requiert la participation des concepteurs et des fabricants d'expérience, qui vont analyser les environnements de fabrication et les produits à fabriquer afin d'identifier des facteurs de fabrication à considérer pendant la conception (Harik et Sahmrani, 2010). Deux méthodes générales permettent l'identification des facteurs de fabrication dans l'industrie du PDE: l'approche qualitative, basée sur l'intuition des concepteurs et fabricants, et l'approche quantitative basée sur les données relatives aux options de fabrication (Ramaswamy, 1998).

## **1.8 Identification des facteurs de fabrication**

Comme dans l'industrie du PDE, deux méthodes sont utilisées dans l'industrie de l'AIC pour identifier des facteurs de construction (Shi et Li, 2008):

- l'identification de facteurs par des méthodes qualitatives, basées sur l'interrogation ou l'intervention des entrepreneurs spécialisés sur leur expérience et leurs connaissances (Sebastian et van Berlo, 2010);
- l'identification des facteurs par des méthodes quantitatives, basées sur l'analyse des données accessibles relatives au processus à étudier. Cette méthode utilise les modèles mathématiques. La qualité des résultats pour cette méthode dépend grandement de la qualité des données étudiées (Lantz, 2015a ; Thanaki, 2017 ; Raschka et Mirjalili, 2019).

Il est possible de s'inspirer de ces deux méthodes pour identifier dans les projets de construction de structures en acier, les facteurs de fabrication à partir des processus existants.

### **1.8.1 Identification des facteurs de fabrication à partir des RFIs**

Il est impossible de réaliser un projet de construction de structures en acier sans RFIs (Robinson, 2007). Dans un RFI, on peut trouver : le nom ou le numéro du projet, les noms de l'émetteur et du destinataire, les dates d'envoi, le sujet du RFI, la localisation géographique du sujet concerné par le RFI, la date retour souhaitée, le contenu du RFI et la signature de l'émetteur (voir Figure 1.1).

<b>REQUEST FOR INFORMATION</b>	
NOM OU NUMERO DU PROJET	<u>NOM DE L'ENTREPRISE</u>
<b>Emetteur :</b>	<b>Numéro du RFI :</b>
<b>Date d'envoi :</b>	<b>Destinataire :</b>
<b>Sujet du RFI :</b>	<b>Date de retour souhaitée :</b>
<b>Localisation :</b>	
<b>Contenu du RFI :</b>	
<b>Signature émetteur :</b>	

Figure 1.1 Exemples d'une fiche de RFI

Les RFIs adressent un problème précis, destinés à une personne spécifique. Un grand nombre de RFIs traduit une conception de mauvaise qualité (Tilley, 1998). L'utilisation des RFIs pour améliorer la qualité de la phase de conception et réduire les gaspillages a déjà fait l'objet de plusieurs études (Papajohn *et al.*, 2018 ; Andrews, 2005 ; Hughes *et al.*, 2013 ; Tilley, 1998 ; Mohamed, Tilley et Tucker, 1999).

La deuxième prémisse sur laquelle se fonde cette thèse est qu'une analyse des contenus des RFIs peut permettre d'identifier des facteurs à fort impact sur la durée de fabrication des composants des structures d'acier.

### 1.8.2 BIM pour l'identification des facteurs de fabrication

Le Building Information Modeling (BIM) est défini comme une technologie et des processus utilisés par les professionnels de l'AIC, pour mieux planifier, concevoir, construire et gérer la construction des bâtiments (Sacks *et al.*, 2018). Dans les projets de construction de structures en acier, le BIM permet de concevoir facilement les ouvrages, de simuler les opérations de montage, et de mieux considérer les quantités de matières premières (Mohsenijam et Lu, 2016). Le BIM permet la centralisation des informations autour d'un modèle numérique et paramétrique appelé « BIM modèle » voir Figure 1.2 (Sharqi et Kaka, 2014).

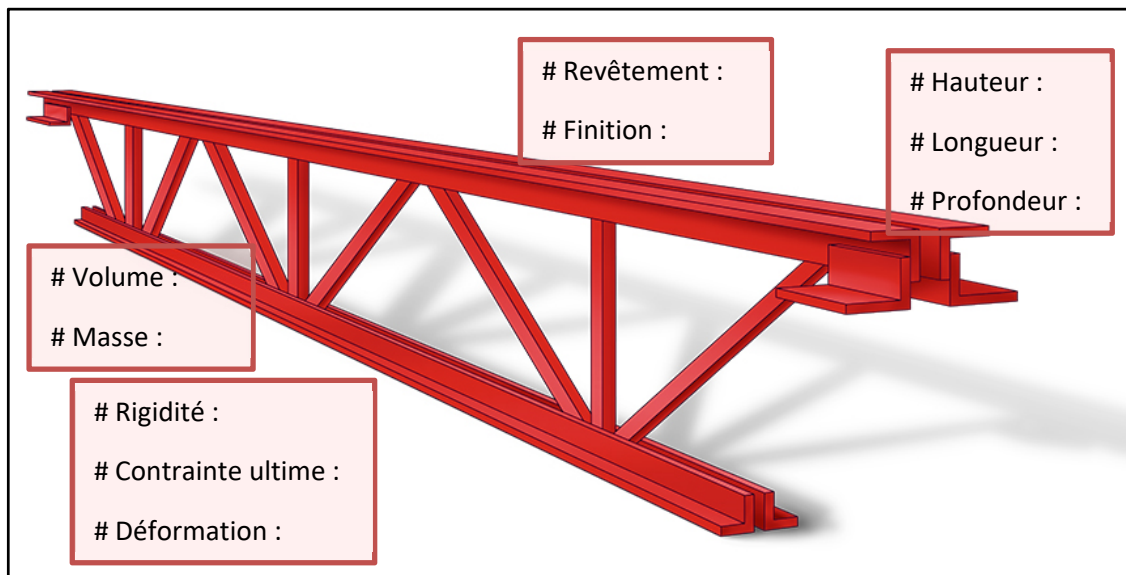


Figure 1.2 Modèle BIM d'une solive en acier  
Tirée de Groupe Canam (2021)

Comme illustré à la Figure 1.2, le modèle BIM permet d'apprécier visuellement les caractéristiques d'un composant de structures d'acier. Ce modèle peut contenir des informations relatives à sa géométrie, ses propriétés physiques, ses propriétés mécaniques, et à tous les aspects du cycle de vie d'un ouvrage en acier ( finition, fabrication, érection, etc.). C'est aussi pour ces quelques raisons que les modèles BIM sont aussi utilisés comme source

d'informations destinée à la fabrication et l'assemblage des structures d'acier (Robinson, 2007). Les modèles BIM ont d'ailleurs déjà été utilisés pour la prédiction des coûts et des durées de construction dans l'industrie de l'AIC (Alshamrani, 2017 ; Son et Kim, 2015 ; Sonmez, 2011).

Dans l'industrie du PDE, la CAO est considérée comme une technologie qui permet de matérialiser pratiquement les idées de la conception (Da Silva *et al.*, 2014). La CAO est une méthode pour simuler les prototypes et aider à la définition des produits, quelle qu'en soit leur complexité (KELLEY, 2001). La CAO permet aux ingénieurs de visualiser et de jouer avec le modèle conçu (Schrage, 1999). La CAO permet une meilleure communication entre participants et permet plus de créativité (Paulus et Nijstad, 2003). Tous les avantages cités de la CAO peuvent permettre aux concepteurs de procéder à des analyses du type DFMA sur les modèles conçus (Boothroyd, 1994 ; da Silva, 2017 ; Da Silva *et al.*, 2014). Le BIM (partie technologie de modélisation) l'industrie de l'AIC étant assimilable à la CAO dans le PDE, il est raisonnable de proposer que le BIM permet une analyse plus systématique des options de fabrication et d'assemblage des structures d'acier (Brennan, Gupta et Taleb, 1994).

La troisième prémisse sur laquelle se fonde cette thèse est que les modèles BIM peuvent servir à l'identification des facteurs à fort impact sur la durée de fabrication de composantes structures d'acier.

### **1.8.3 Identification des facteurs de fabrication à partir des d'entrevues individuelles et collectives**

Les entrevues sont une méthode en recherche qualitative qui a pour objectif d'explorer les opinions, les expériences les motivations et les croyances des individus sur un sujet spécifique relatif à leur domaine d'expertise (Roulston et Choi, 2018 ; Gill *et al.*, 2008 ; Kitzinger, 1994 ; Morgan, Krueger et King, 1998). Les entrevues sont utilisées lorsqu'une compréhension profonde est requise sur un sujet donné, ou quand plus de détails sont requis sur une réponse donnée (Silverman, 2000).

Les concepteurs et les fabricants de structures d'acier reconnaissent la nécessité d'intégrer les connaissances et l'expérience des fabricants pendant la phase de conception. Dans le cadre d'une recherche académique où il n'y a pas de raisons de conflits entre concepteurs et fabricants, il est possible de procéder à des entrevues impliquant à la fois des concepteurs et les fabricants de structures d'acier.

La quatrième prémisse sur laquelle se fonde cette thèse est que les entrevues avec des concepteurs et fabricants de structures d'acier peuvent permettre d'identifier des facteurs à fort impact sur le temps de fabrication, et de formuler des règles de conception pour réduire la durée de fabrication des structures d'acier.

## **1.9 Méthodes pour identifier les facteurs de fabrication**

La disponibilité des données telles que les RFIs et les modèles BIM ne suffit pas pour identifier les facteurs de fabrication. En effet, il y'a en moyenne, 796 RFIs par projet de construction (Hughes *et al.*, 2013) et les informations contenues dans les modèles BIM sont trop nombreuses pour être analysées et interprétées par un cerveau humain. La nécessité d'utilisation de méthodes s'appuyant sur les technologies de l'information capables d'analyser et d'interpréter les données s'impose.

### **1.9.1 Apprentissage machine (AM) pour analyser les modèles BIM**

L'AM est une science qui consiste à donner aux ordinateurs des compétences pour apprendre et agir comme des humains, et d'améliorer leur apprentissage de façon autonome au fur et à mesure que les données leur sont fournies (Kelleher, Mac Namee et D'arcy, 2015 ; Lantz, 2015b ; Raschka et Mirjalili, 2019). L'AM est utilisé pour résoudre les problèmes qui sont difficiles, voire impossibles à résoudre pour un cerveau humain, à cause du grand nombre de données (Anand Rajagopal, 2017 ; Raschka et Mirjalili, 2019). Plusieurs applications de l'AM sont disponibles dans le domaine des finances (Rainer, 2013 ; Lingitz *et al.*, 2018), dans le PDE (Cheng *et al.*, 2010 ; Ansari-Ch *et al.*, 2011 ; Esmacilian, Behdad et Wang, 2016), et dans l'industrie de l'AIC (Koo, Hong et Hyun, 2011 ; Runzhi Jin *et al.*, 2012 ; Zhong et Wu, 2015 ;

Sarkar, Vinay et Maiti, 2016) avec des avantages très appréciés notamment en termes de fiabilité, de précision, et de rapidité.

L'AM a déjà été utilisé dans les projets de construction de structures en acier pour permettre aux professionnels de prédire le temps de fabrication des structures d'acier en exploitant des modèles BIM des ouvrages précédents (Koo, Hong et Hyun, 2011 ; Son et Kim, 2015). Cette thèse se propose d'analyser les modèles BIM avec des algorithmes du AM afin d'identifier des facteurs de fabrication de structure d'acier.

### **1.9.2 L'analyse qualitative des contenus (AQC) sur des RFIs et le verbatim des entrevues**

L' AQC est une méthode de recherche qui s'applique aux données textuelles pour la compréhension humaine (Downe-Wamboldt, 1992). C'est une méthode qui permet d'analyser les textes en fonction des caractéristiques du langage naturel, avec une attention particulière sur la signification des contenus (Graneheim, Lindgren et Lundman, 2017). Trois méthodes existent dans le AQC, dépendamment des données à analyser : le codage fermé ou déductif où les codes sont prédéfinis à partir d'une théorie existante ; le codage ouvert ou inductif, où les codes émergent du texte ; et le codage mixte qui résulte de la combinaison des deux.

L'AQC peut s'effectuer manuellement quand le nombre de pages de textes à analyser n'est pas très grand. Pour de très nombreuses pages de textes à analyser, cette analyse peut aussi s'effectuer automatiquement avec des logiciels informatiques (Kaefer, Roper et Sinha, 2015).

Cette thèse basée non seulement sur le codage ouvert pour analyser automatiquement les RFIs à l'aide de logiciel de l'AQC, mais également sur l'approche manuelle à codage mixte pour identifier des facteurs de fabrication à partir du verbatim issu des entrevues avec les concepteurs et les fabricants de composantes de structures d'acier.

## 1.10 Synthèse

Les concepteurs des projets de construction à structures en acier ont besoin de connaître les facteurs relatifs à la phase de fabrication pour réduire les durées de fabrication dans la phase de conception. Les facteurs identifiés peuvent servir à l'élaboration des règles de conception. Les projets de construction de structures en acier se présentent comme un candidat idéal pour expérimenter des règles de conception du type DFMA. Proposer des règles de conception requiert une identification des facteurs de fabrication de structures d'acier. Deux approches permettent l'identification des facteurs : l'approche par analyse qualitative aux moyens des entrevues et de RFIs, l'approche quantitative au moyen des analyses logiques et calculs mathématiques. L'approche quantitative requiert l'utilisation des données précises relatives aux opérations de fabrication de structures d'acier. Les modèles BIM et les RFIs sont des sources d'informations pertinentes pour identifier les facteurs de fabrication. À cause de l'importante quantité d'informations présentes dans les modèles BIM et le grand nombre de RFIs, l'utilisation de techniques d'analyse peut aider dans l'identification des facteurs. Ainsi, l'AQC pour les RFIs et entrevues et l'AM pour les modèles BIM, peuvent aider dans l'analyse des données afin l'intention d'identifier des facteurs de fabrication pouvant aboutir aux règles de conception.

Pour identifier des facteurs de fabrication et proposer des règles de conception, cette thèse propose la méthodologie détaillée dans le chapitre suivant.

## CHAPITRE 2

### DÉMARCHE DE TRAVAIL ET ORGANISATION DU DOCUMENT

#### 2.1 Démarche du travail

La démarche de cette thèse est illustrée à la Figure 2.1. Cette démarche est bâtie autour des concepts d'identification des facteurs de fabrication et de formulation de règles de conception. Trois sources de données sont utilisées pour les identifier : les RFIs, les modèles BIM et les verbatim d'entrevues avec les concepteurs et les fabricants de structures d'acier. Deux approches sont utilisées :

- une approche quantitative qui utilise les algorithmes du AM de régression linéaire sur les modèles BIM, soit le Random Forest Regressor (RFR) et du Gradient Boosting Regressor (GBR);
- deux approches qualitatives sont utilisées : l'une qui utilise un codage ouvert sur les RFIs, et l'autre qui utilise un codage mixte sur les verbatim.

Le contexte industriel disponible pour cette thèse permet la mise en disposition des RFIs (18 408 RFIs) provenant de 26 projets, de 15 444 modèles BIM correspondants aux solives (Joists) de charpentes métalliques et 6 professionnels fabricants et concepteurs de composantes de structures d'acier. Ces données vont permettre d'identifier les facteurs de fabrication ayant le plus d'impact sur le temps de fabrication. Ceux-ci serviront à la formulation des règles de conception dans l'article 3.

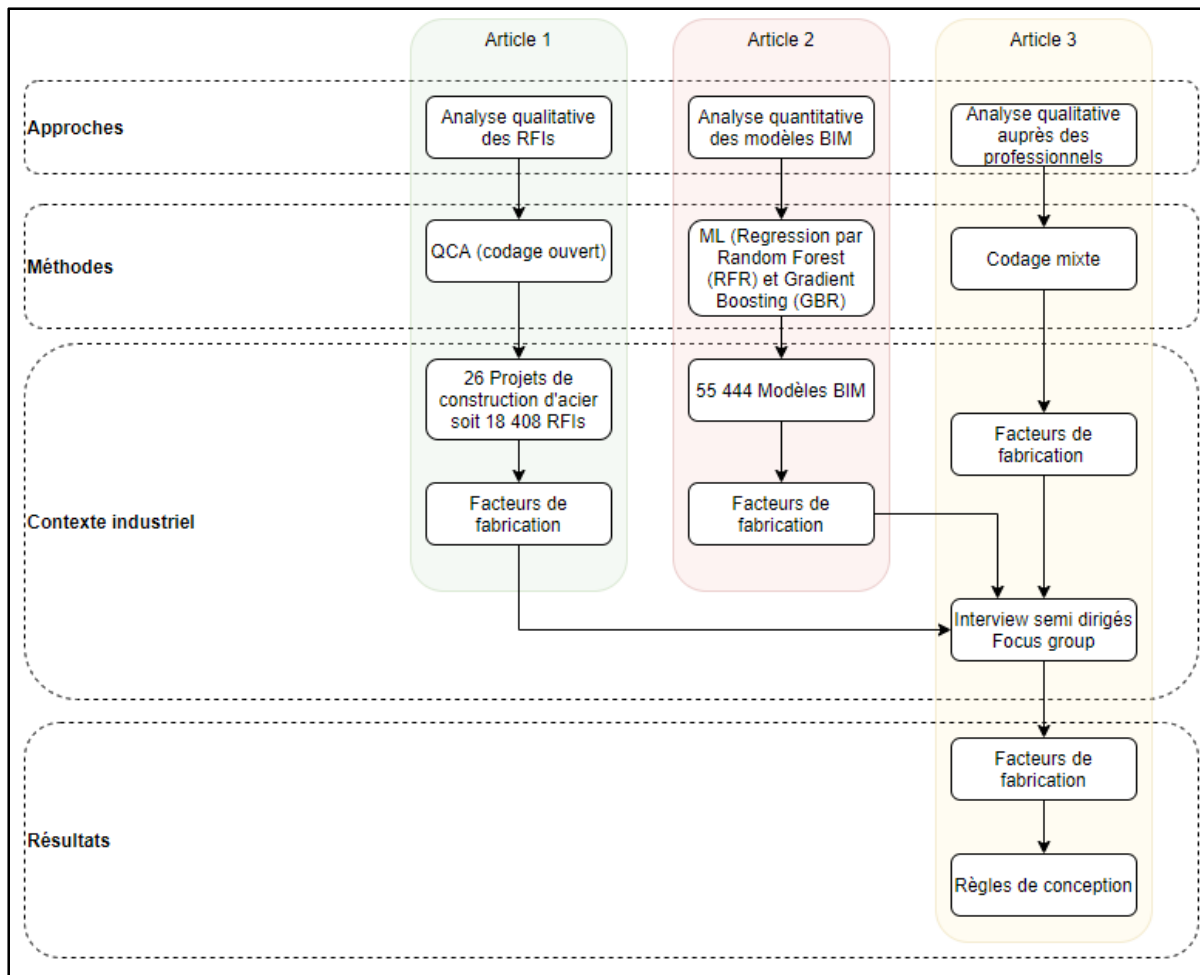


Figure 2.1 Choix de la méthodologie

## 2.2 Choix du contexte industriel

Dans l'environnement industriel du Québec où cette thèse s'est réalisée, il n'est pas évident de trouver un partenaire industriel ouvert aux initiatives de recherche. Cependant, par l'entremise du Groupe de Recherche d'Intégration et de Développement Durable (GRIDD), nous avons eu l'opportunité de discuter avec les membres de l'équipe d'innovation du Groupe-Canam, qui a trouvé un véritable intérêt à participer à la réalisation de ce projet de recherche. C'est ainsi que ce travail de thèse a eu le privilège de se voir réalisé avec la participation du Groupe-Canam.

Le Groupe-Canam est l'un des fabricants majeurs de structures d'acier en Amérique du Nord. Il se spécialise dans la conception et la fabrication des composants métalliques pour

l'industrie de la construction. L'entreprise exerce dans le domaine des bâtiments, des charpentes métalliques et des ponts. Elle exploite huit usines au Canada et aux États-Unis ainsi que des bureaux d'ingénierie au Canada, en Roumanie et en Inde. L'entreprise compte environ 2675 employés (Groupe-Canam, 2021).

Le Groupe-Canam gère des milliers de projets chaque année, soit environ 10 000 projets. Pour y arriver, Il utilise le BIM et les meilleurs processus de gestion de projets (Groupe-Canam, 2021). Ce grand nombre de projets permet la disponibilité des RFIs et des modèles BIM essentiels pour la réalisation de ce travail.

L'entreprise sert une grande variété de clients qui réalisent leur projet en mode DBB. Pour y arriver, le Groupe-Canam a des bureaux de conception et des usines de fabrication qui opèrent de façon indépendante. Pendant la conception, les concepteurs reçoivent des dessins préliminaires de la part des clients ou architectes. Ces informations sont souvent acheminées sur la forme des fichiers en format IFC (Industry Foundation Classes) ou des nuages de points. Les fichiers en format IFC sont des fichiers orientés objet destinés à assurer le partage d'informations entre les logiciels BIM. Sur la base des informations qu'ils reçoivent, les concepteurs utilisent des logiciels BIM pour procéder au choix et types des profilés et composantes qui entrent dans la structure de l'ouvrage à fabriquer. Le résultat final du travail de conception est un modèle BIM de la structure à fabriquer, qui contient toutes les informations nécessaires pour fabriquer l'ouvrage. Une phase de détaillage permet de produire les plans détaillés à partir des modèles BIM. Ces plans sont communiqués aux fabricants pour l'usinage et l'assemblage.

Si les informations contenues dans les dessins détaillés sont insuffisantes, incomplètes, ou ne prennent pas en considération les facteurs de fabrication, les fabricants vont produire des requêtes pour information afin de réclamer des informations complémentaires et faire des propositions de modification.

## **2.3 Identification des facteurs de fabrication et formulation des règles de conception**

Cette thèse propose trois sources de données, pour identifier les facteurs de fabrication et proposer des règles de conception. L'exploitation de chacune de ces sources fait l'objet d'un article.

### **2.3.1 Article 1: Qualitative analysis of Requests for Information to identify design flaws in steel construction projects**

Le premier article concerne la mise en place d'une méthodologie pour l'identification des facteurs de fabrication de structures d'acier à travers une analyse qualitative des RFIs. Cet article propose d'utiliser le AQC (codage ouvert) sur les RFIs de 26 projets, soit huit projets de moins de 999 tonnes, huit projets de tonnage situés entre 999 et 4999 tonnes, et dix projets de plus de 5000 tonnes.

Cet article montre qu'il est possible d'identifier des facteurs à fort impact sur la durée des projets et la nécessité d'impliquer des concepteurs et des fabricants de structures d'acier pour la formulation de quelques règles de conception.

### **2.3.2 Article 2: BIM Machine Learning and Design Rules to improve the assembly time in steel construction project**

Le deuxième article concerne la mise en place d'une méthode basée sur l'AM afin d'identifier les facteurs à fort impact sur la durée de fabrication. Un cas pratique permet d'analyser 55 444 modèles BIM, et d'identifier les facteurs à fort impact sur le temps de fabrication des poutrelles. Ces facteurs constituent des bases de connaissances importantes à considérer pour améliorer la conception des prochaines poutrelles, et pour proposer quelques règles de conception.

### **2.3.3 Article 3: A qualitative approach and Design Rules to improve steel construction projects**

Le troisième article que propose cette thèse se divise en deux parties :

La première partie propose une analyse qualitative menée auprès des concepteurs et fabricants des structures d'acier, afin d'identifier les facteurs à fort impact sur la durée de fabrication des structures d'acier. Les résultats de cette recherche qualitative sont comparés avec les résultats obtenus des deux articles précédents.

La deuxième partie propose des règles de conception et d'initiatives pour réduire la durée de fabrication des structures d'acier. Pour se faire, cet article s'inspire de facteurs identifiés précédemment dans les deux précédents articles et des facteurs proposés par la méthode qualitative auprès des concepteurs et fabricants des structures d'acier.



## CHAPITRE 3

### QUALITATIVE ANALYSIS OF REQUESTS FOR INFORMATION TO IDENTIFY DESIGN FLAWS IN STEEL CONSTRUCTION PROJECTS

Mathieu Fokwa Soh <sup>a</sup>, Daniel Barbeau <sup>b</sup>, Sylvie Doré <sup>a</sup>, Daniel Forgues <sup>a</sup>.

<sup>a</sup>Département de Génie de la construction, École de technologie supérieure,  
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3.

<sup>b</sup>Groupe Canam - Centre administratif, 270 Chemin du Tremblay, Boucherville,  
Québec J4B 5X9

Article publié dans « Organization, Technology and Management in Construction »,  
Février 2020.

#### 3.1 Abstract

Requests for information (RFIs) is a formal process used in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) industry to address design flaws between designers and contractors. A large number of RFIs is a sign of a lack of precision or coordination in the design documents. However, RFIs produce rich, precise, and structured information. Analyzing their content can help identify recurring problems between designers and construction teams, and better tailor future projects to the working context of the contractors. This article presents a method for identifying recurring issues during the design phase of steel construction projects through the analysis of the contents of RFIs. It is original in the use of a Qualitative Content Analysis (QCA) tool can make this analysis fast for large quantities of RFIs. The identification of recurrent problems of contractors will allow the establishment of rules to take into consideration during the design phase of future steel construction projects. A case study with 26 steel

construction projects demonstrates the feasibility of this method. This case study shows that, given the same design and construction teams, recurring problems shown in RFIs do not differ according to the scale of the projects. In this case, the main issue between designers and contractors is the lack and inadequate presentation of information related to the connection of steel components. Identifying these problems can pave the way for initiatives to improve the design phase. Also, identifying these problems can be an essential step in making contractors' knowledge available to designers early in the projects.

**Keywords:** Construction phase; design flaws; design phase; design quality; requests for information; qualitative design; steel construction projects; summative qualitative content analysis.

### 3.2 Introduction

Many factors affect the success of a project in the AEC industry, among which the quality of collaboration between the design and the construction teams (Zaker et Coloma, 2018 ; Jin *et al.*, 2018 ; Latham Sir, 1994 ; Egan, 1998). Designers provide information that contractors will use to create a product that will satisfy the customer's needs (Tilley, 1998). However, whereas eighty-eight percent of decisions concerning the duration and cost of projects are made by the designers (Evers et Maatje, 2000), they often have little experience or knowledge to ensure the constructability of their design solutions. This situation results in design requirements for construction that are incomplete, inadequate, or poorly coordinated. Contractors, who usually integrate projects after completion of the design phase (Forgues et Iordanova, 2010 ; Fokwa Soh *et al.*, 2018 ; Barrett, 2016), will formulate RFIs to obtain information regarding issues or lack of precision in the proposed design or to suggest better alternatives (Mohamed, Tilley et Tucker, 1999 ; Hughes *et al.*, 2013). An RFI is by definition a formal document produced to request information or clarification from designers (Andrews, 2005). In a project, the quantity of RFIs is relative to the quality of the design (Fokwa Soh *et al.*, 2019 ; Mohamed, Tilley et Tucker, 1999 ; Papajohn *et al.*, 2018). The RFIs that contractors submit during a project are

numerous and have a significant impact on the cost and duration (Jeong *et al.*, 2016 ; Fokwa Soh, Forgues et Doré, 2017). We argue that design quality could be significantly improved, and the cost and duration of subsequent projects could be reduced by taking into account the information requested in the RFIs of previous projects to improve future projects. To do so, this article proposes to use a summative qualitative analysis of the content of RFIs to highlight the information most requested by contractors. Once problems are clearly identified, designers will be better equipped to deal with them and provide better information in future projects. To this end, this article, which is an extended version of the paper presented during the Creative Construction Conference 2019 (Fokwa Soh *et al.*, 2019), first shows the importance of involving contractors' requirements into the design phase to improve the construction processes and the significant role that RFIs can play in this improvement. It then presents a method that analyses the textual contents of RFIs to highlight recurring problems. A case study is carried out in the steel construction industry. The results of this case study are analyzed and discussed later.

### **3.3 The importance of involving contractors' requirements into the design phase**

The AEC industry is a dynamic and complex sector that brings together several stakeholders from different disciplines. Traditional AEC project delivery practices create many problems such as isolation of professionals, sequential work, lack of coordination between design and construction, resulting in fragmentation. Fragmentation is defined by Abadi (2005) as *“the division resulting from the increasing number of both professions (i.e. architect, engineer) and organizations involved in all processes of a building project. This has been caused by the growing demand for differentiation and specialization as building projects increase in both size and complexity”*. The non-involvement of contractors in the design phase and the increase in the need for contractor specialization for project implementation tend to increase the amount of waste, reduce the quality of the design phase documents and increase the number of RFIs in AEC industry projects. This situation causes discussions, waste of time and money during the realization of projects (Abadi, 2005 ; Onungwa et Uduma-Olugu, 2017). Integrating the requirements and knowledge of contractors during the design phase would be a great asset to

improve the quality of the design. To do this, this article proposes to identify recurring problems between designers and contractors. These problems often emerge from the design documents.

### **3.4 Improve design documents to improve the industry construction process**

Preceded by needs analysis, the design phase is one of the first phases of a project's life cycle in the AEC industry. The quality of the buildings in a construction project depends on the quality of the design documents (Burati Jr, Farrington et Ledbetter, 1992 ; Crotty, 2012 ; Abolnour, 1994 ; Assaf, Hassanain et Abdallah, 2018 ; Hosny, Ibrahim et Elmalt, 2019). A useful design document is defined as one that provides contractors with all the information required for efficient construction. (Tilley, 1998 ; Assaf, Hassanain et Abdallah, 2018).

Inadequate design and documentation may lead to a poor quality project. Improper design is characterized by defects and ambiguities found in design documents (Lutz, Hancher et East, 1990 ; Assaf, Hassanain et Abdallah, 2018 ; Fokwa Soh *et al.*, 2019). These defects are either conflicts, omissions, or errors (Lutz, Hancher et East, 1990). They are the leading cause of resumption of work (Love *et al.*, 2010), and increased construction project costs. These defects represent 78% of the number of modifications, 9.5% of the global costs of the projects (Burati Jr, Farrington et Ledbetter, 1992 ; Setiawan, Waluyo et Sagara, 2019), 50% of the contract changes (Nigro, 1987), and 46% of contractual claims (Diekmann et Nelson, 1985). Business Week ("quality" 1982) stated that manufacturers claimed that 15 to 20% of their sales were used to correct errors. Moreover, according to these same manufacturers, the best way to increase profits is to reduce the cost of poor quality rather than increase sales (Burati Jr, Farrington et Ledbetter, 1992). Design flaws constitute the bulk of the administrative time reserved for projects, the origin of legal disputes, the dissatisfaction of customers, the reduction of worker safety, and motivation (Lutz, Hancher et East, 1990).

According to Hughe et al. (2013), there are approximately 796 RFIs per project in the AEC industry, and it takes an average of nine days to respond to an RFI. This corresponds to an average of 13,535 hours-person average per project. The cost to respond to a single RFI for a 1-10 million USD project can range from \$ 598 to \$ 2 078 (Sparksman, 2015).

The appropriate phase to improve the quality of construction projects Standard the design phase (Lawson, 2006 ; Crotty, 2012 ; Zhang *et al.*, 2015). Between 6% and 23% of the original project cost estimate (Lutz, Hancher et East, 1990), and 7% of the overall project cost (Nigro, 1987), can be reduced very early in projects by having designers working with contractors. But, in a traditional project delivery method, this process is challenging and expensive to implement because it involves the presence of contractors during the design phase (Elvin, 2007). Besides, design and construction professionals are culturally different (Lawson, 2006). Involving them in the same stage of a project's life cycle can lead to endless arguments that will prolong the duration of the project and impinge on the quality of the final work (Kent et Becerik-Gerber, 2010).

Design reviews are a current practice to identify issues during the design process. They are considered operations to ensure the quality of contractual design documents (Lutz, Hancher et East, 1990). The adoption of design reviews in the process may help to identify and reduce design errors. However, design reviews are hampered by the fact that they are often performed by designers and not by construction professionals. This can explain why design flaws remain present in design documents despite design reviews (Lutz, Hancher et East, 1990).

### **3.5 The use of RFIs to improve the quality of the design**

RFIs are a reliable source to convey information. For Andrews (2005), RFIs are the conventional approach of communication between designers and contractors. They respond to a standard protocol that aims to make the information claim very useful. Each RFI corresponds to one and only one technical problem. The information needs and/or modification proposals in the RFIs are generally precise, clearly expressed, and signed by a professional who assumes responsibility for the request. These characteristics of the RFIs are entirely part of the standard code of practices established by the American Institute of Steel Construction (AISC) and the Australian Institute of Steel Construction (AISC). These characteristics also give the RFIs high credibility as a source of information. We posit that these characteristics can be exploited to improve the quality of design phases and largely, all construction projects.

The use of RFIs to improve the quality of construction projects has already been the subject of some studies. Mohamed et al. (1999) and Papajohn et al. (2018) have studied the factors that influence the response time of RFIs and their impacts throughout projects. Burns (2007) studied RFIs to provide quantitative information on the relationship between selected RFI variables and performance in the shop floor production process. Burns (2007) also established a significant association between production performance of shop drawings, production performance in terms of cost and duration. Burns (2007) used a regression model to identify individual input variables of RFIs that largely influenced the predicted production performance of shop drawings. In an analysis of the causes, effects, and indicators of design defects, Tilley (1998) also proposes to quantify the causes of RFIs as a criterion for assessing design flaws in a construction project.

These studies show that RFIs can play a significant role in developing the quality of projects. To achieve this, one of the main steps is to develop a suitable methodology, which can extract from the analysis of RFIs, the knowledge necessary for the development of the design phase.

### **3.6 Methodology**

This article presents a method to identify recurrent design flaws by analyzing the textual content of RFIs. The case study concerns an analysis of 18,408 RFIs from 26 projects. The projects were completed from 2006 to 2018 by a single major steel manufacturing company in North America. These are the 26 most recent structural steel projects, chosen because they are carried out by the same design team and by the same manufacturing team, in a design-bid-build type of contract. These projects are also selected because all of their RFIs were available.

Design flaws may vary depending on the complexity of the projects. The number of structural elements, the number of interactions between these elements, and the unpredictable combined effects between these elements can result in different problems during construction Corning (1998). For this reason, this study proposes to divide the projects into three different groups. The classification is based on their tonnage. Thus, the small projects are those that count from 0 to 999 tons of steel, medium projects from 1 000 to 4 999 tons of steel, and large projects from 5 000 to 30 000 tons of steel. These projects are organized as follows:

- 828 RFIs with 9 832 response time (in days) of RFIs for eight small projects;
- 2 369 RFIs with 20 701 response time (in days) of RFIs for eight medium-sized projects;
- 15 211 RFIs with 508 594 response time (in days) of RFIs for ten Large projects see (Table 3.1).

The response time (in days) corresponds to the number of days between the day of transmission of the RFIs, and the day of its response. The day of issue of the RFIs is included in the count

Table 3.1 Set of data (1/3)

	<b>Codifications</b>	<i>SP1</i>	<i>SP2</i>	<i>SP3</i>	<i>SP4</i>	<i>SP5</i>	<i>SP6</i>	<i>SP7</i>	<i>SP8</i>	<b>Total</b>
<b>Small Projects (SP)</b>	RFIs quantities	124	47	42	78	105	32	289	111	828
	Response Time (in days)	414	472	679	753	1780	787	3496	1451	9832
<b>Medium Projects (MP)</b>	<b>Codifications</b>	<i>MP1</i>	<i>MP2</i>	<i>MP3</i>	<i>MP4</i>	<i>MP5</i>	<i>MP6</i>	<i>MP7</i>	<i>MP8</i>	
	RFIs quantities	192	191	457	202	581	324	198	224	2369
	Response Time (in days)	3047	2701	1890	3135	1371	1264	2592	4701	20701

Table 3.2 Set of data (2/3)

Large Projects (LP)	Codifications	<i>LP1</i>	<i>LP2</i>	<i>LP3</i>	<i>LP4</i>	<i>LP5</i>	<i>LP6</i>	<i>LP7</i>
	RFIs quantities	672	4 693	317	1650	821	1304	2340
	Response Time (in days)	62128	297230	14448	38 321	8125	7968	42348

Table 3.3 Set of data (3/3)

Large Projects (LP)	Codifications	<i>LP8</i>	<i>LP9</i>	<i>LP10</i>	<i>Total</i>
	RFIs quantities	1808	517	1089	<i>15211</i>
	Response Time (in days)	11672	8970	17384	<i>508594</i>

The RFIs for each of the project groups were extracted and prepared for the analysis.

To analyze these RFIs, two approaches were possible (Minichiello, Aroni et Minichiello, 1990):

- the quantitative approach used to analyze fixed, measurable and quantitatively comparable data, and;
- the qualitative approach, concerned with understanding human behavior through data analysis based on the description of the themes and factors that characterize a situation.

The qualitative approach is chosen for this study because of the nature of the data (textual data) and the objective of the study, which concerns the identification of design flaws.

Ideally, the qualitative analysis of RFI text content should be carried out by designers or by specialized contractors. This is because of their implication in the projects concerned by RFIs, and their use of a common language for their profession. However, RFIs are numerous in construction projects. Studying RFIs to extract factors that can improve the quality of design phases is humanly tricky. There is, therefore, the need to devise a method that relies on the automatic analysis of RFIs to extract information essential to improve the quality of the design from a large dataset. One of the easily accessible tools for automatically analyzing text content is Qualitative content analysis (QCA).

QCA is a research method that applies to textual data for human understanding (Downe-Wamboldt, 1992). This is one of the research methods used to analyze texts based on the characteristics of natural language, with particular attention to the meaning of textual content (Budd, Thorp et Donohew, 1967 ; Lindkvist, 1981 ; McTavish et Pirro, 1990 ; Tesch, 1990 ; Graneheim, Lindgren et Lundman, 2017). QCA aims to classify knowledge and understand the phenomena present in the texts through a subjective interpretation (Graneheim, Lindgren et Lundman, 2017 ; Vaismoradi et Snelgrove, 2019). There are different typologies to characterize qualitative approaches. This study makes use of that proposed by Hsieh and Shannon (2005). They classify methods into three types: conventional, direct, and summative. The significant differences between these approaches are the origin of codes, coding schemes, and the threat to reliability (Hsieh et Shannon, 2005). In the conventional approach, the coding categories are derived directly from the data of the text to be studied. In the direct approach, the analysis begins with a theory already established or based on research derived taxonomies. The summative approach involves counting and comparing (usually keywords or content), followed by the interpretation of the underlying context. Because the proposed method for this study aims to consider recurring problems by identifying keywords and interpreting their meaning, the summative approach seems the most suitable for the qualitative analysis of the RFIs.

Using the summative approach makes it possible to identify the main words present in the groups of RFIs. These words, which represent themes or codes, are then analyzed and

compared. Finally, recommendations are formulated according to these themes. Figure 3.1 illustrates the workflow while the following paragraphs provide more details on how the method was carried out:

*Data preparation:*

The quality of a content analysis depends on the quality of the data at our disposal (Lantz, 2015a ; Thanaki, 2017). Thus, the first part of the method consists of finding all the RFIs contained in the previous projects selected for this article. Manual processing eliminates courtesy and civility formulations, surnames and names, and details that are not relevant information for a design document (Table 3.4). It is then necessary to adapt the data to the understanding of the machine (Han, Pei et Kamber, 2011). This adaptation consists of tokenization, lemmatization, and stops word removal processes (see Figure 3.1).

Tokenization is the process of splitting the flow of textual content into words, symbol terms, or other essential elements of understanding called tokens. The process of lemmatization or stemming is a method of representing words in ways that retain only their meaning. In this process, the nouns are converted to a singular masculine name, and the verbs are all converted to their infinitive form. Stop word removal is about simplifying the text by removing the words that do not have significant importance in communication (Vijayarani et Janani, 2016).

Table 3.4 Example of how to group and classify RFIs

RFI_N°	RFIs	RFI_Issued_Date	RFI_Response_Date	Response_Time (in days)
1	Dimensions Discrepancies between grids	16/02/2017	17/02/2017	1
2	Beam size discrepancy	16/02/2017	17/02/2017	1
...	...	...	...	...
n	non-standard W beam size	16/02/2017	17/02/2017	1

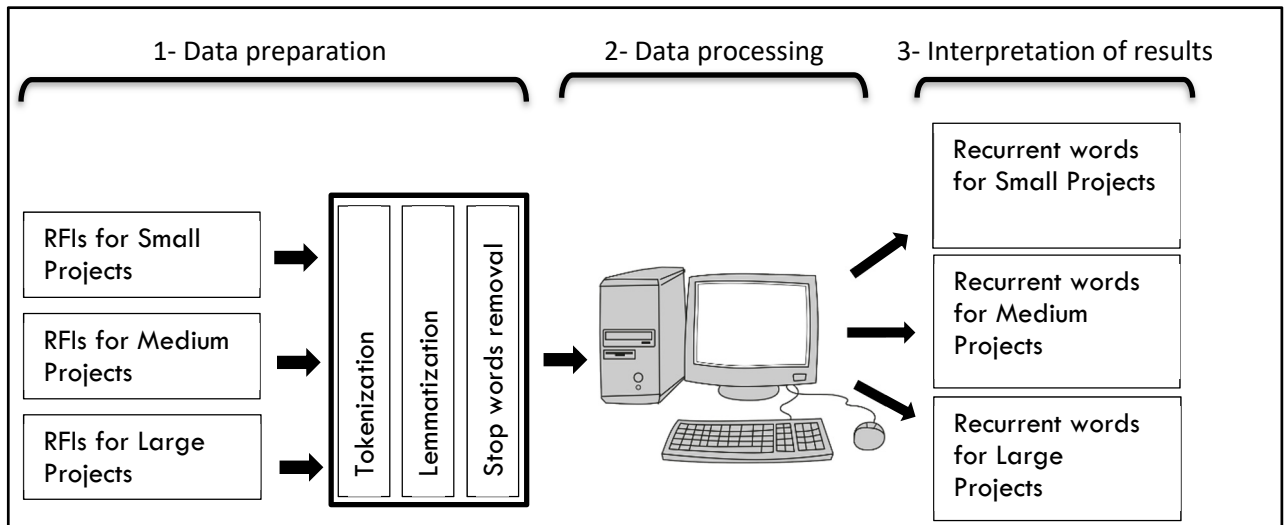


Figure 3.1 Process to identify recurrent words in RFIs

*Data processing:*

This part consists of treating all the RFIs to identify the most frequent words and to classify them in a table (Mei et Zhai, 2005). These words are analyzed and defined as recurring themes in the content of RFIs. These themes represent the main design flaws facing contractors. To validate the results, this article proposes to quantify the RFIs that contain the most recurrent themes, and also to represent the response times of the RFIs that contain these themes. The figures obtained give an appreciation of the impact of each theme on a project. Three lists of the most recurrent words are created depending on the scope of the project.

### 3.7 Result presentation

The results are a list of words most present in the RFIs and the corresponding response time for projects of different scales. The results also present the relationships that exist between the most frequent words.

### 3.7.1 Small projects

The small projects selected for the case study correspond to the structural construction of small businesses or offices building.

The most common words in the set of RFIs for small projects are as follows (Table 3.5):

Table 3.5 Words most frequent in the set of small projects RFIs

Words	Frequencies of words	Similar words	% of RFIs concerned	% of corresponding Response time
provide	148	provide, provided	18%	18%
connections	119	connectant, connexion, connections	17%	14%
confirm	118	confirm, confirmation, confirme, confirmed	20%	16%
beam	110	beam, beams	13%	10%
detail	80	detail, details	10%	12%
location	72	locate, location, locations	8%	9%
dimension	69	dimension, dimensions	8%	9%
plate	67	plate, plates	9%	8%
missing	62	missing	6%	9%
column	60	column, columns	8%	7%
elevation	51	elevation, elevator	7%	9%
roof	51	roof	4%	8%
complex	45	complexes	5%	4%
provide or confirm	266		38%	34%

The column “% of corresponding Response time (days)” corresponds to the percentage impact of RFIs caused by each of these words or groups of words on the overall waiting time for RFIs.

Analysis and interpretation of RFI results for small projects:

- the words Provide, Connection, Confirm, and Beam are the most recurrent words in the set of RFIs;
- the words Provide or Confirm are present in 39% of the RFIs. Also, the RFIs that contain Provide or Confirm cause 34% of response time before a response;
- the word connection is also widely represented in the set of RFIs. It is present in 17% of RFIs and, the RFIs that contain the word connection cause 14% response time;
- the word Connection is linked to the words Provide, Confirm, Line, Information and Beam (Figure 3.2);
- some words are found in several RFIs at the same time, which explains why the total number of percentages of words contained in RFIs may be higher than 100%.

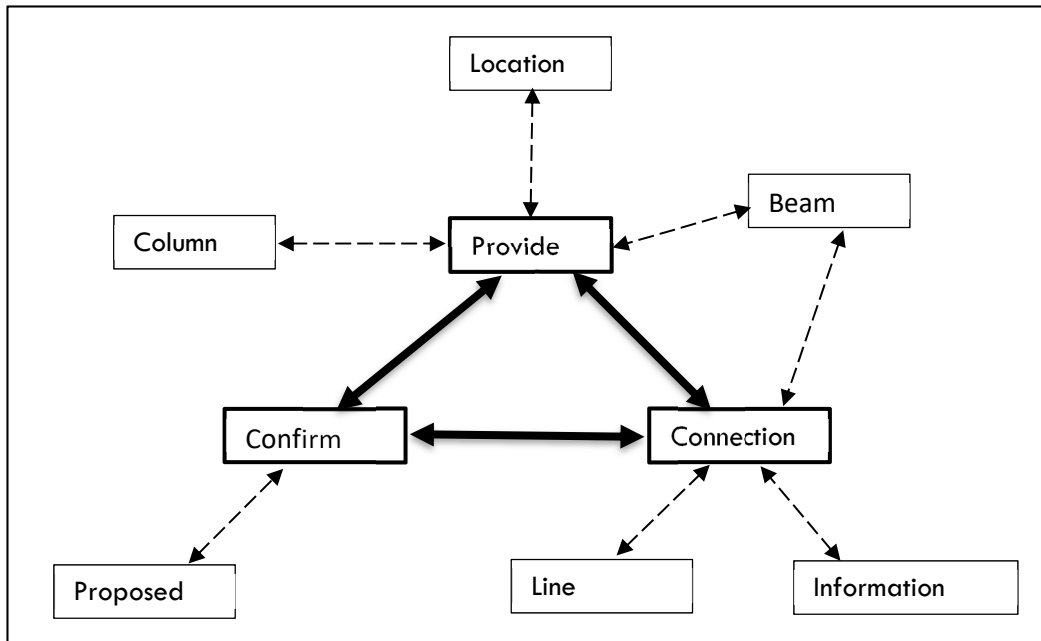


Figure 3.2 Relationships between the three most frequent words in the RFIs of small projects and the other recurrent words

The bold squares represent the most recurring words contained in the RFIs set (e.g. Connection) while the simple squares represent the moderately recurring words. The bold arrows indicate the most recurrent groups of words in the RFIs set (e.g. Confirm-Connection), while the arrows with dashed line represent the moderately recurring groups of words in the RFIs set.

From the above, we can state that the analysis of the textual content of the RFIs of small projects can allow the identification of two main recurring problems present in the design documents:

- the need for contractors to obtain additional information regarding localization, beams, columns, and connections;
- the need for contractors to obtain more information related to the connections.

### 3.7.2 Medium projects

The medium projects selected for the case study concern the construction of large buildings for retail or development and the extension of sports centers and leisure areas. The most frequent words in the set of RFIs for medium projects are the following (Table 3.4):

Table 3.6 Words most present in the set of medium projects RFIs

Words	Frequencies of words	Similar words	% of RFIs concerned	% of corresponding Response time
confirm	897	confirm, confirmation, confirmed, confirmer	38%	20%
connections	499	connect, connectant, connected, connection, connections	21%	17%
provide	440	provide, provided	19%	25%
beam	261	beam, beams	9%	9%
sketches	245	sketch, sketched, sketches	10%	3%
dimension	192	dimension, dimensions	8%	12%
column	190	column, columns	8%	9%
location	178	locate, located, locating, location, locational, locations	8%	13%
detail	137	detail, detailed, detailing, details	6%	10%
plate	134	plate, plates	6%	5%
lines	128	line, lines	6%	4%
stair	121	stair, stair#1, stair#2, stair#7, stairs	5%	10%
grids	117	grid, grids	5%	4%
elevator	114	elev, elevation, elevations, elevator, elevators	4%	7%

Table 3.6 Words most present in the set of medium projects RFIs (continuation)

Words	Frequencies of words	Similar words	% of RFIs concerned	% of corresponding Response time
brace	110	brace, braced, braces, bracing, bracings	3%	2%
confirm or provide	1337		57%	45%

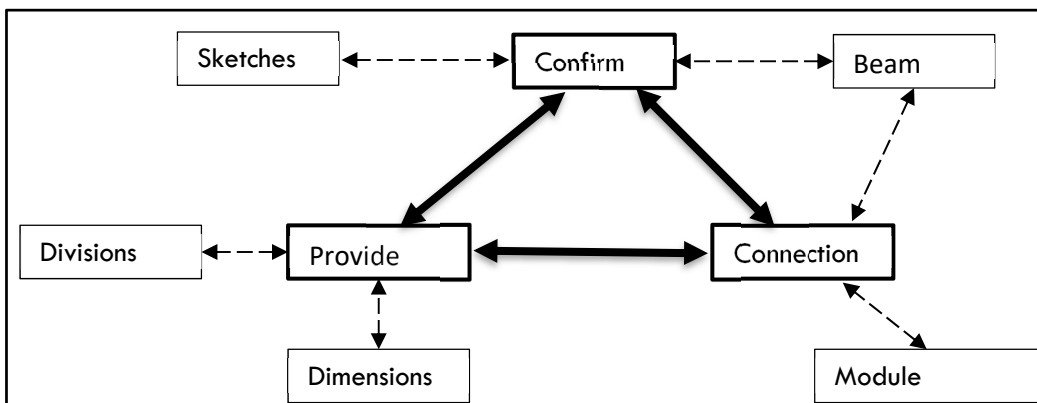


Figure 3.3 Relationships between the three most frequent words in the RFIs of medium projects and the other recurrent words

Analysis and interpretation of the results relating to the RFIs of the medium projects.

- the words Provide, Confirms, Connection, and Beam are the most common in RFIs;
- confirm or Provide correspond to 56% of RFIs medium projects. Also, the RFIs of medium projects that contain Confirm or Provide cause 45% of response time before a response;
- like for small projects, the word Connection is also widely represented. It is present in 21% of RFIs and causes 17% of response time;

- the word Connection is linked to the words Confirm, Provide, Module and Beam (Figure 3.3).

From the above, we can affirm that the analysis of the textual content of the RFIs of medium projects, such as the analysis of small projects, can allow the identification of recurring problems in design documents such as:

- the need for contractors to obtain additional information related to dimensions, location (represented here by “division”), beam and sketches;
- the need for contractors to receive more information about connections.

### **3.7.3 Large projects**

The Large projects selected for this study are those related to the construction of shopping centers, stadiums, and large buildings.

*Frequency of words and themes.*

The most common words in the set of RFIs for large projects are as follows (Tableau 3.5).

Table 3.7 Words most present in the set of large projects RFIs

Words	Frequencies of words	Similar words	% of RFIs concerned	% of corresponding Response time
confirm	2383	confirm, confirmation, confirmations, confirmed	16%	7%
connections	2325	connect, connected, connecting, connection, connections	15%	10%
clarify	2305	clarifie, clarified, clarify	4%	4%
levels	2214	level, levels	14%	18%
layout	1818	layout, layouts	12%	15%
beams	1592	beam, beam@, beams	10%	4%
provide	1549	provide, provided, provides, providing	10%	5%
detail	1121	detail, detailed, detailing, details	7%	5%
zones	978	zone, zones	6%	18%
elevator	802	elev, elevation, elevation@, elevations, elevator, elevators	5%	5%
dimensions	799	dimension, dimension@, dimensions	5%	2%
missing	792	missed, missing	5%	3%
plates	751	plate, plate@, plated, plates	5%	1%
lines	739	line, lines	5%	3%
confirm or provide	3932		26%	12%

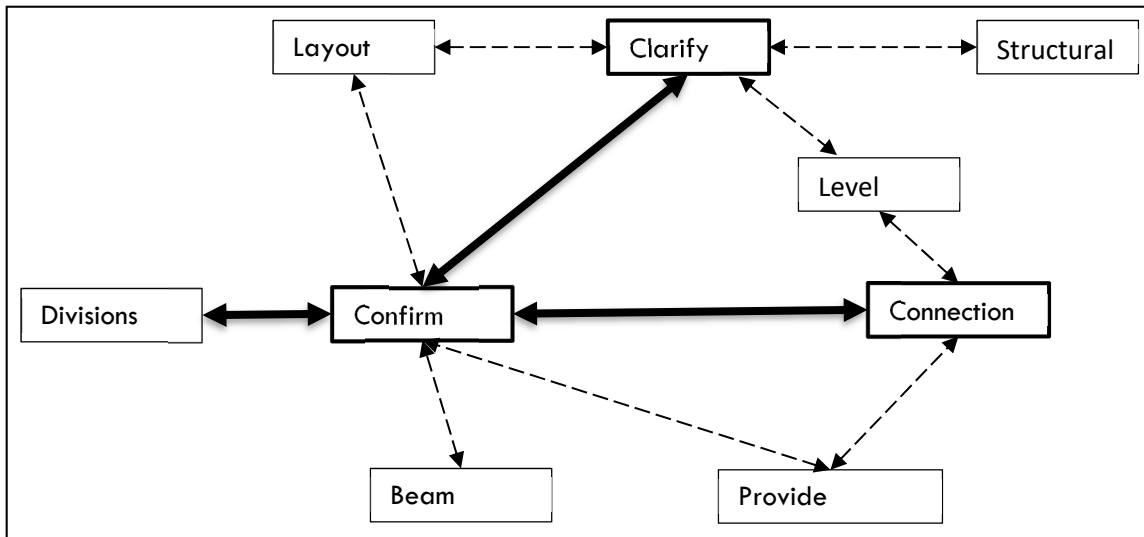


Figure 3.4 Links between the three most frequent words in the RFIs of large projects

Analysis and interpretation:

- the words Clarify, Confirm Connection, and Level are the most recurrent in the set of RFIs for large projects;
- the words Provide, or Confirm are present in 26% of the RFIs. The RFIs that contain this word cause 12% of the response time of the RFIs of the large projects;
- the word connection is also widely represented. The word Connection is contained in 15% of RFIs. Also, the RFIs that contain this word cause 10% of the response time.

From the above, we can affirm that, such as for small and medium projects, the analysis of the textual content of the RFIs of large projects can allow the identification of recurring problems in the design documents. In the case of this study, we have:

- the need for additional information related to the location (represented here by “level” or “division”), sketches (represented here by “layout”), and beam;
- the need for specific information relating to connections.

The word connection seems to refer to a large number of RFIs. The study proposes a representation of the impact of the word “connection” per project on RFIs, and on the response times related to the RFIs that contain this word (ses Tableau 3.5).

Table 3.8 The impact of the word connection on the RFIs studied

	Codifications	RFIs quantities	RFIs (Qty) with	% of RFIs (Qty) with Connection.	Average of RFIs with	Standard Deviation	Response Time (in days)	waiting days for RFIs with Connection	% of waiting days of RFIs with	Average of waiting days of RFIs with	Standard Deviation
Large Projets	LP1	672	75	11,16%	15%	0,11	62128	11885	19,13%	10%	0,16
	LP2	4693	3	0,06%			297230	683	0,23%		
	LP3	317	61	19,24%			14448	5551	38,42%		
	LP4	1650	462	28,00%			38321	16177	42,21%		
	LP5	821	138	16,81%			8125	247	3,04%		
	LP6	1304	426	32,67%			7968	2799	35,13%		
	LP7	2340	659	28,16%			42348	10089	23,82%		
	LP8	1808	378	20,91%			11672	1256	10,76%		
	LP9	517	28	5,42%			8970	158	1,76%		
	LP10	1089	110	10,10%			17384	1874	10,78%		
		15211	2340						508594		

Table 3.8 The impact of the word connection on the RFIs studied (continuation)

	Codifications	RFIs quantities	RFIs (Qty) with Connection	% of RFIs (Qty) with Connection.	Average of RFIs with Connection	Standard Deviation	Response Time (in days)	waiting days for RFIs with Connection	% of waiting days of RFIs with Connection	Average of waiting days of RFIs with	Standart Deviation
Medium Projects	MP1	192	40	20,83%	21%	0,12	3047	443	14,54%	17%	0,13
	MP2	191	29	15,18%			2701	385	14,25%		
	MP3	457	58	12,69%			1890	218	11,53%		
	MP4	202	58	28,71%			3135	1109	35,37%		
	MP5	581	239	41,14%			1371	520	37,93%		
	MP6	324	32	9,88%			1264	77	6,09%		
	MP7	198	3	1,52%			2592	6	0,23%		
	MP8	224	44	19,64%			4701	733	15,59%		
		2369	503						20701		
Small Projects	SP1	124	29	23,39%	17%	0,07	414	87	21,01%	14%	0,07
	SP2	47	7	14,89%			472	20	4,24%		
	SP3	42	6	14,29%			679	109	16,05%		
	SP4	78	6	7,69%			753	119	15,80%		
	SP5	105	11	10,48%			1780	85	4,78%		
	SP6	32	1	3,13%			787	59	7,50%		
	SP7	289	64	22,15%			3496	724	20,71%		
	SP8	111	14	12,61%			1451	167	11,51%		
		828	138						9832		

With 0.06%, 1.52% and 3.13%, LP2 MP7 and SP6 projects are projects where the word connection is very rarely used in RFIs. Also, the RFIs of these projects that contain the word connection represent respectively: 0.23%0.23% and 7.5% of the response times for RFIs for these projects. The reasons given by the professionals involved in these projects are that: the LP2 and MP7 projects concern the construction directly related to public transport. And the SP6 project concerns the rehabilitation of a hotel building. These three projects did not involve the use of several connections.

Otherwise, generally speaking, 17% of RFIs in small projects, 21% of medium projects, and 15% of large projects contain the word connection. The RFIs that contain this word cause 14%, 17%, and 10% of the response times of the RFIs of these projects respectively.

### **3.8 Discussions**

In general, this article shows that for steel construction projects:

- a summative qualitative analysis of RFI content can identify the most recurrent design flaws that hinder the contractor's work;
- this analysis can also propose the quantity of RFIs, and the corresponding response time related to the recurring themes identified;
- the identification of these flaws can promote initiatives that aim to reduce the quantity of RFIs, the response time of RFIs, and improve the quality of design documents for future projects;
- this analysis can also promote the formulation of design information in a way that is adapted to the needs of contractors. The use of Building Information Modeling (BIM) technology may have a significant role to play in promoting better formulation and efficient transfer of information between designers and contractors (Zou, Kiviniemi et Jones, 2017).

In the specific case of the case study:

- the recurring words in the RFIs of the selected projects do not change much according to the size of the projects, as seen in tables 3.3,3.4 and 3.5;
- the words Provide, Confirm, and Clarify directly related to information needs. This may justify the primary defect in the design of steel structures in the design office, which is the absence or misrepresentation of information in design documents;
- the words Provide, Confirm, and Clarify are linked to the words Beam (or columns) and Location (division or level) for all types of projects. In our opinion, this highlights systematic errors while producing and providing information on the location and description of steel structural elements during the design phase of steel projects. The words “Provide”, and “Confirm” are mainly related to the word Proposed in the small projects of steel construction. This can justify the presence of numerous proposals made by the contractors to the design teams on the design of the structural elements of the small steel construction projects;
- the word connection is really represented in RFIs in a general way. This may reflect the fact that there is a real problem with how connections are designed and communicated to contractors;
- the word Connection is also linked to the words Beam and Column (structural). Connections in the steel construction industry are used to connect beams and columns. Linking these words with the word Connection may justify the absence of the essential information required for the connection from the beams and columns;
- also, some projects have more than 20% of the response time (in days) caused by RFIs that contain the word connection see figure 3.2. It may be interesting to look with the concerned parties to discover the particularity of these projects. This analysis may give an idea of the types of projects that cause a long period of response time;

Structural steel designers participating in this case study suspected that connection design was the source of many RFIs received over the years. The method confirms the suspicion and can quantify this phenomenon, both in terms of frequency of occurrence and time delay.

The case study helps to identify recurring problems in the RFIs of small, medium, and large projects. In general, the issues are related to the lack of information related to structural elements, their positions in space and the way connections are designed. The manufacturer has already taken corrective measures. Time will tell if taking them into account will help to improve the quality of the design documents for a future small, medium and large projects. An analysis of the textual content of the RFIs of future projects will provide information on the effectiveness of these measures.

This method can also be applied to other professions in the construction industry, which are affected by fragmented processes. This will require a coordinated RFIs process that respects the standards given by AISC. It will also require sets of RFIs from previous projects, written by the same contractor teams, and intended for the same design teams. If these conditions are not met, the recurrent problems contained in the RFIs may vary significantly from one project to another, and the estimation of their impact may be uncertain.

### **3.9 Conclusion**

This article proposes to improve the quality of steel construction projects through a systematic method, which applies a qualitative analysis on RFIs text content, to identify the most recurrent information needs, formulated by contractors towards designers. RFIs are highly structured textual data sources that contain the needs of contractors to designers. The particularity of this study is that this paper uses a qualitative summative method using QCA Software rather than an investigation between designers and contractors. The use of the software here is simply due to the large quantity of RFIs usually present in projects in the AEC industry. A case study presented in this article shows the feasibility of this method in steel construction projects. In terms of results, this article shows that RFIs are rich in useful quality information, and that, RFIs can be used to improve the quality of the project design phase in the AEC industry. This article also indicates that it is possible to extract recurring problems from design documents. The results of the case study developed in this article indicate that the recurring issues contained in RFIs do not depend on the size of the projects. These problems also reflect the need to improve the way connection information is formulated. This article has reinforced

suspicious and prompted initiatives on the part of the professionals of the company concerned by the case study. In perspective, this study proposes to take into account the information needs expressed in the case study on an ongoing project and to assess the impact of these recommendations.



## CHAPITRE 4

### BIM MACHINE LEARNING AND DESIGN RULES TO IMPROVE THE ASSEMBLY TIME IN STEEL CONSTRUCTION PROJECTS

Mathieu Fokwa Soh <sup>a</sup>, Daniel Barbeau <sup>b</sup>, David Bigras <sup>b</sup>, Sylvie Doré <sup>a</sup>, Daniel Forgues <sup>a</sup>.

<sup>a</sup>Département de Génie de la construction, École de technologie supérieure,  
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3.

<sup>b</sup>Groupe Canam - Centre administratif, 270 Chemin du Tremblay, Boucherville,  
Québec J4B 5X9

Article soumis pour publication dans « Journal of Constructional Steel Research »,  
Juillet 2021.

#### 4.1 Abstract

Integrating knowledge of the construction phases into the design phase can have a very positive impact on construction industry projects. This paper proposes a quantitative approach to identify design rules and production system improvements for reducing operating time in construction projects, based on previous project BIM models and regression algorithms. A case study conducted with 55,444 steel joist BIM models is used to validate this method with a major North American manufacturer. This case study shows that: the weight of the structures, the weight of the reinforcement, and the camber of the joists greatly influence the assembly time of the joists. This article is a practical case of using machine learning algorithms and BIM models rather than interviews with professionals to identify knowledge specific to a given

process. This method can be applied to other professions in the construction industry, such as suppliers of wood structures, glass panels, and steel reinforcement. BIM models and operating times will be required in these cases.

Keywords: BIM models, Machine Learning, Design Rules, Steel Joists, Construction Industry, Assembly time.

## 4.2 Introduction

The fabrication phase of structural steel projects represents 30 to 40% of the overall building cost (Carter et Schlafly, 2008). Yet, the decisions taken during the design phase affect 88% of the costs and time of execution of the steelworks (Evers et Maatje, 2000). However, the highest interest of the designers remains the compliance with standards (Schmidt *et al.*, 2018) and the appropriate choice of structural elements for the resistance of the structures (Heinisuo, Laasonen et Haapio, 2010). Not much time a few minutes to a few hours, is devoted to the evaluation of models for cost and time reduction and the search for alternative solutions during the design phase (Barg, Flager et Fischer, 2017). These evaluations are made without taking into account the particularities of the manufacturing plant where the work is going to be carried out (Haapio, 2012 ; Watson *et al.*, 1996 ; Pavlovčič, Krajnc et Beg, 2004). This situation leads to a sub-optimal design (Latham Sir, 1994 ; Egan, 1998 ; Fokwa Soh *et al.*, 2019). In the traditional Design Bid Build (DBB) procurement in which a project is carried out in a linear and fragmented process, manufacturing specialists often intervene at the end of the design phase (Botton et Forgues, 2017 ; Fokwa Soh, Forgues et Doré, 2017). At this moment, the modification they make cause delays and additional costs in the completion of the projects (Jeong *et al.*, 2016). This situation is similar to the situation in the Product Development Engineering (PDE), in the 1990s.

In PDE, designers and manufacturers collaborate formally through different methods and design rules, such as design for manufacturing and assembly (DFMA) (Boothroyd, 1994). These rules provide designers with the essential knowledge to reduce the cost, the time, the tools, the number of operations, the quantity of material, and the number of workers during

projects while improving quality during the manufacturing and assembly of parts from the design phase (Da Silva *et al.*, 2014), and for a specific workshop (Holt et Barnes, 2010).

DFMA consists of identifying and considering manufacturing and assembly constraints during design. The outcome of this process leads to design rules and tools, which help to obtain simplified and standardized products suitable for the manufacturing and assembly process (Boothroyd, 1994 ; Da Silva *et al.*, 2014). The DFMA methodology also contributes to the improvement of the manufacturing and assembly process by integrating structural changes that promote the consideration of important design criteria (Selvaraj, Radhakrishnan et Adithan, 2009). A case study from Douglas Commercial Airlines demonstrates the significant benefits of using DFMA in a manufacturing process. Notably: 51% reduction in the number of parts, 37% reduction in the cost of manufacturing parts, 50% faster time to market, 68% improvement in the quality and reliability of the final product, 62% reduction in assembly time and 57% reduction in manufacturing time (Ashley, 1995).

DFMA identifies design factors with a high impact on manufacturing and assembly processes (Halevi et Weill, 2012). One approach in identifying these factors is to hold meetings with designers, manufacturers and assemblers with extensive knowledge and experience to assess the design factors available for a designed product (Boothroyd, 1994 ; Harik et Sahmrani, 2010 ; Goh et Chua, 2016). The identified factors help to establish criteria that will allow the evaluation of different product designs (Harik et Sahmrani, 2010). This approach, which seems to be possible to implement in the PDE, is difficult to apply in the construction industry because of the context of Design Bid Build (DBB), where there is real fragmentation between project phases (Lawson, 2006 ; Elvin, 2007 ; Soh *et al.*, 2020). However, recent work in the field of machine learning (ML) shows that it is possible to extract knowledge from digital data of a process. Therefore, Building Information Modeling (BIM) offers data that are very suitable for the use of ML in the construction industry. We believe that BIM and ML can assist in data collection and knowledge extraction in steel construction projects. We also believe that this knowledge can help to establish design rules such as DFMA to help reduce fabrication time and increase quality in steel construction projects.

The objective of this study is to propose an approach that identifies design rules through BIM models of previous projects and regression algorithms. For that, this article suggests a literature review to justify the choice of methodology, a methodology, and a case study with 55,444 BIM models of steel joists. The BIM models are from a major North American steel structure manufacturer.

### **4.3 Literature review**

#### **4.3.1 Choice of a knowledge extraction method**

The extraction of knowledge specific to construction processes is one of the main motivations of industrial and scientific organizations related to the construction industry. Among these organizations, the Construction Industry Institute (CII) (Song, Mohamed et AbouRizk, 2009) and the Independent Project Analysis (IPA) (McCuish et Kaufman, 2002) consider that the extraction of knowledge from processes is essential for verifying constructability and seeking efficiency during projects.

Two classes of methods can be used to extract knowledge from an industrial process: qualitative and quantitative.

The qualitative method is based on the analysis of speech and texts from experts, from their experiences, from conferences or brainstorming (Shi et Li, 2008).

The quantitative method provides knowledge based on the statistical and historical characteristics of the available data. This method mainly uses mathematical models in a scientific logic to propose a probabilistic form, the phenomena that may occur in a given process with identified input data (Shi et Li, 2008).

In the context of large amounts of data, one of the significant limitations of using qualitative methods in knowledge extraction is the limit of analysis of the human brain (Shi et Li, 2008). In the steel construction industry, data has grown exponentially since the advent of BIM and machine controllers (Carter et Schlafly, 2008). Also, the traditional nature of contracts in the

construction industry forces a separation between the design and construction phases (Crotty, 2012 ; Sacks *et al.*, 2018). This separation is accentuated by the increasing level of complexity of projects and the growing level of client requirements, which requires specialization of activities in the construction industry (Banks *et al.*, 2018). Another barrier to the use of the qualitative method is the difference in academic training between design and construction professionals. Indeed, the organization of brainstorming between professionals in these two professions can lead to costly and unproductive discussions caused by the difference in perception of these two professions (Lawson, 2006 ; Elvin, 2007).

Given these difficulties, this article proposes the use of a quantitative method based on machine learning (ML) to bypass human limitations related to knowledge extraction.

#### **4.3.2 Machine learning to identify and extract knowledge**

The construction of steel structures requires complex fabrication and assembly operations (Carter et Schlafly, 2008). Complex fabrication systems require sophisticated and accurate prediction systems, such as those proposed by machine learning (ML) (Lingitz *et al.*, 2018). ML is the science of giving computers the ability to learn and act as humans do, and improve their learning over time autonomously by providing data and information from a real process. ML is also defined as a process that extracts models automatically from historical data (Kelleher, Mac Namee et D'arcy, 2015). ML belongs to the domain of Artificial Intelligence (AI). AI is a field of research that aims to reproduce, through artificial systems, the different cognitive capacities of human beings (Anand Rajagopal, 2017). One of the most targeted objectives of AI use is its ability to solve complex problems that are beyond human competence (Lantz, 2015a ; Anand Rajagopal, 2017 ; Lingitz *et al.*, 2018 ; Raschka et Mirjalili, 2019), as well as to develop programs capable of learning from data (Michalski, Carbonell et Mitchell, 2013). Numerous applications of ML are found in the fields of finance, insurance, and medicine (Rainer, 2013 ; Lingitz *et al.*, 2018). ML is also found in manufacturing production management (Cheng *et al.*, 2010 ; Ansari-Ch *et al.*, 2011 ; Esmailian, Behdad et Wang, 2016), and in construction (Koo, Hong et Hyun, 2011 ; RunZhi Jin *et al.*, 2012 ; Wu *et al.*, 2015 ;

Sarkar, Vinay et Maiti, 2016). The observed benefits of ML in construction are widely appreciated in the industry (Rainer, 2013 ; Lingitz *et al.*, 2018).

#### **4.3.3 Choice of the type of learning and the type of algorithm**

Two main approaches exist for ML: supervised learning and unsupervised learning (Lantz, 2015a). Supervised learning applies to processes with known output data. The objective here is to understand the relationship between input and output data. Unsupervised learning is applied to a series of data that is not understood. The goal here is to find a natural link between these data (Chapelle, Scholkopf et Zien, 2009 ; Huang *et al.*, 2014).

The study proposed in this article is a simple application case of ML. Supervised learning with a regression algorithm is suitable for this study (Lantz, 2015a ; Thanaki, 2017).

Regression algorithms consist of building a prediction model and training it with available data so that it responds accurately to new data belonging to the process to be studied (Kelleher, Mac Namee et D'arcy, 2015). Several cases of regression-based operating time prediction exist in the literature (Lingitz *et al.*, 2018). In each of these cases, a comparison between algorithms allows the identification of the algorithm that best fits the study (Öztürk, Kayaligil et Özdemirel, 2006 ; Meidan *et al.*, 2011 ; Lingitz *et al.*, 2018).

#### **4.3.4 Ensemble learning**

In the field of prediction with regression algorithms, there is increasing interest in the use of Ensemble Learning (EL), which is a method that combines predictions from several algorithms and to aggregate their results to obtain a higher accuracy than any individual algorithm (Liaw et Wiener, 2002). The two main methods used in EL are boosting and bagging (Zhang et Ma, 2012).

In boosting, successive prediction trees make incremental contributions to improve the predictions of previous trees. At the end, a weighted vote is taken for the final prediction. One of the techniques used for boosting is the Gradient Boosting Regressor GBR.

In Bagging, prediction trees do not depend on previous prediction trees. All trees are individually constructed. In the end, a simple majority vote is taken for the prediction (Liaw et Wiener, 2002). The Random Forest Regressor (RFR) is one of the techniques used in Bagging.

The GBR and RFR are both used and compared in this article for knowledge extraction.

To better appreciate the performance of GBR and RFR techniques in knowledge extraction, this study proposes to use another linear regression technique: Lasso (least absolute shrinkage and selection operator).

Lasso is a regression method that performs variable selection and regulation to improve the accuracy of predictions and the interpretation of the statistical model it produces (Tibshirani, 1996). The method was popularized by Robert Tibshirani in 1996 and is widely used today in the field of ML, in the specific case of linear regressions. The objective of the method is to minimize the prediction error. For that, the Lasso method imposes a constraint on the sum of the absolute values of the model parameters, the sum must be less than a fixed value. The imposition of constraints is done by applying a process of narrowing (regulation), or it penalizes the regression variable coefficients by reducing certain to zero (Fonti et Belitser, 2017).

The use of Lasso has many advantages, including the accuracy of predictions by reducing the coefficients. This is particularly useful when the number of observations is small, and the number of characteristics is large. Also, Lasso allows researchers to increase the interpretation of the models by removing irrelevant variables (Fonti et Belitser, 2017).

#### **4.3.5 Evaluation of prediction quality**

It is essential to evaluate the quality of the prediction results. Lantz (2015) suggests the use of Mean Absolute errors (MAEs), and Relative Absolute Errors (RAEs).

MAEs consider how far, on average, the prediction is from the real value (Lantz, 2015a).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad 4.1$$

RAE is a performance metric that compares the actual forecast error to the forecast error of a very simple forecasting model (Hill, 2012).

$$RAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{\sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}|} \quad 4.2$$

To these measurements, we add the Gap between predicted and real-time (GBP). This measure represents the percentage difference between predicted and actual values.

$$GBP = \left| \frac{y_i - x_i}{y_i} \times 100 \right| \quad 4.3$$

Where:

$x_i$  is the predicted value for the individual sample  $i$ ,

$y_i$  is the real value for the individual sample  $i$ ,

$\bar{x}$  is a mean value of  $x$ , with  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

$\bar{y}$  is a mean value of  $y$ , with  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$

$n$  is the sample size

As MAE and GBP get closer to 0 and RAE gets closer to 1, the quality of the prediction improves.

#### 4.3.6 BIM for data extraction

The success of a prediction depends on the quality of the data used (Lantz, 2015a ; Thanaki, 2017). It is essential to pay special attention to the quality of the data coming from a process. BIM offers dedicated technologies and processes for better information management in a construction project (Sacks *et al.*, 2018).

BIM technology offers high-quality data through the BIM models (Shen et Issa, 2010 ; Monteiro et Martins, 2013 ; Eastman *et al.*, 2011), and makes it possible to gather and classify information (Monteiro et Martins, 2013 ; Shen, 2010) specific to different disciplines in a single 3D model. In steel construction, the information extracted from these models can be used for constructability and quantitative estimation (Mohsenijam et Lu, 2016 ; Monteiro et Martins, 2013). This information can also be used for cost and time estimation (Shen et Issa, 2010). These data can be extracted automatically and reduce the data extraction time (Plebankiewicz, Zima et Skibniewski, 2015 ; Hu, Lu et AbouRizk, 2014). The method proposed by this article will use the BIM models as a data source.

#### **4.3.7 BIM is an asset for the success of DFMA in the construction industry**

Three main characteristics of DFMA are the component-based approach, modularization, and standardization (Wah, 2014). BIM can be used as an object-oriented collaborative process to enable the integration of information that can represent the fabrication and assembly phases of steel structures. The application of BIM in the DFMA approach has allowed professionals to easily simulate construction virtually to identify potential constraints that could increase project costs (Wah, 2014). We believe that BIM can bring to the steel construction industry the benefits that Computer-Aided Design (CAD) has brought to DFMA. These include a more systematic analysis of fabrication and assembly options to produce a structural design that is more suited to the available processes (Brennan, Gupta et Taleb, 1994), and fabrication process information to allow for multiple fabrication and assembly simulations (Wah, 2014 ; Alfieri *et al.*, 2020). BIM is used in the construction industry as tools and processes to improve the way buildings are designed and constructed (Sacks *et al.*, 2018).

#### **4.4 Methodology**

According to the *Cross-Industry Standard Process for Data Mining* (CRISP-DM), the main steps in data prediction are *system understanding*, *data understanding*, *data preparation*, *data*

*modeling and outcome evaluation* (Chapman *et al.*, 2000). to these steps, this paper adds *pattern identification* and establishment of *design rules* (see Figure 4.1).

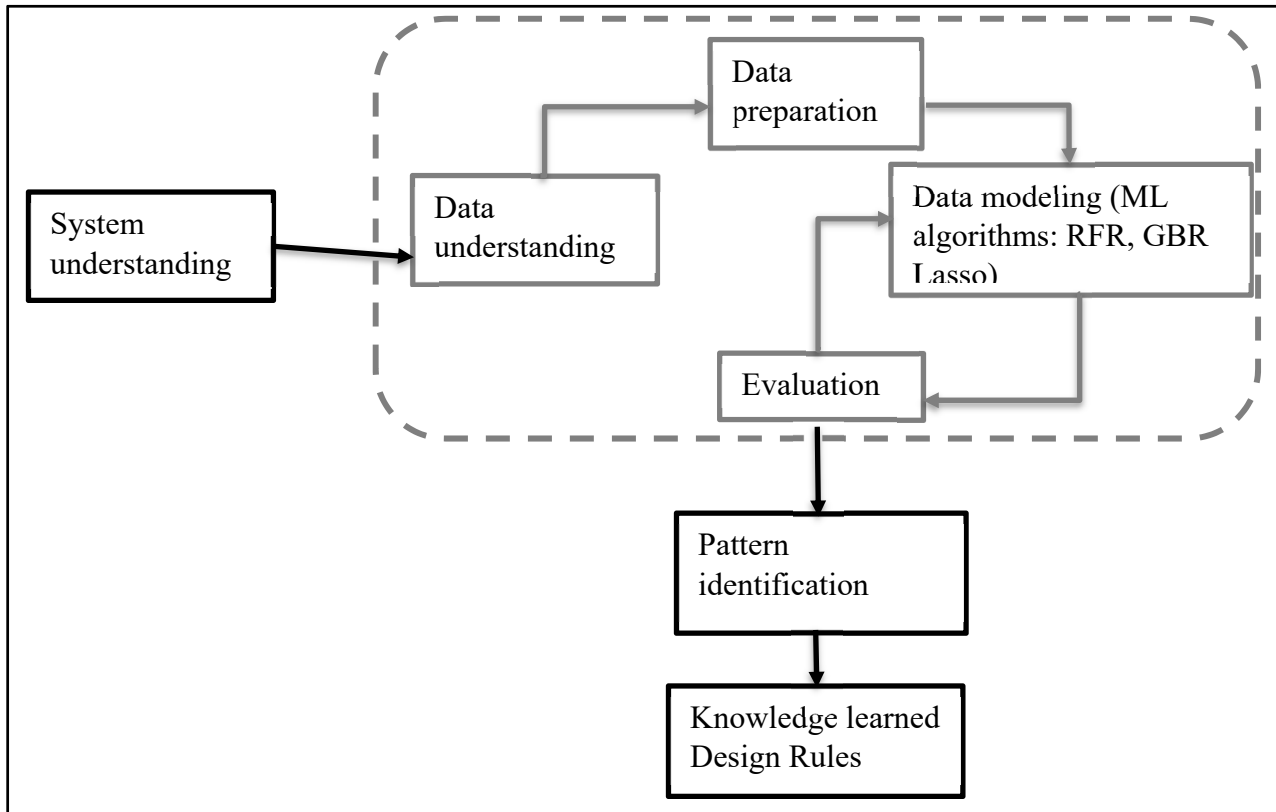


Figure 4.1 Research Methodology

The proposed research approach could be described as follows:

- system understanding: this part consists of understanding the production system, the value to be improved, and the data that characterize this value;
- data understanding: once the system is understood, it is necessary to collect and understand the data characteristics of the value to be improved;

- data preparation: the collected data must be prepared to make them usable to the algorithms that will be used. This step mainly concerns the reduction of noise present in the data;
- data modeling: the prepared data will be used in modeling with the RFR, GBR, and Lasso techniques. The prediction results with these techniques are presented at the end of the modeling;
- evaluation: This step compares the results of the three techniques used for modeling. The algorithm with which MAE and GBP will be close to 0, and RAE get closer to 1, is the one with the best performance;
- pattern identification: this step consists of identifying the variables that have the most impact on the assembly time of steel structures;
- knowledge learned & Design rules: this part consists of understanding the results of the pattern identification, establishing design rules, and formulating recommendations to improve assembly line.

## **4.5 Case study**

The case study in this article concerns the assembly of steel joists for a major manufacturer of steel structures in North America.

### **4.5.1 System understanding**

In the steel construction industry, steel joists are lightweight steel structures that support roofs and floors and transfer the loads they receive directly to the steel structures that support them. Joists are mainly composed of top and bottom chords, webs, and seats (see Figure 4.2)

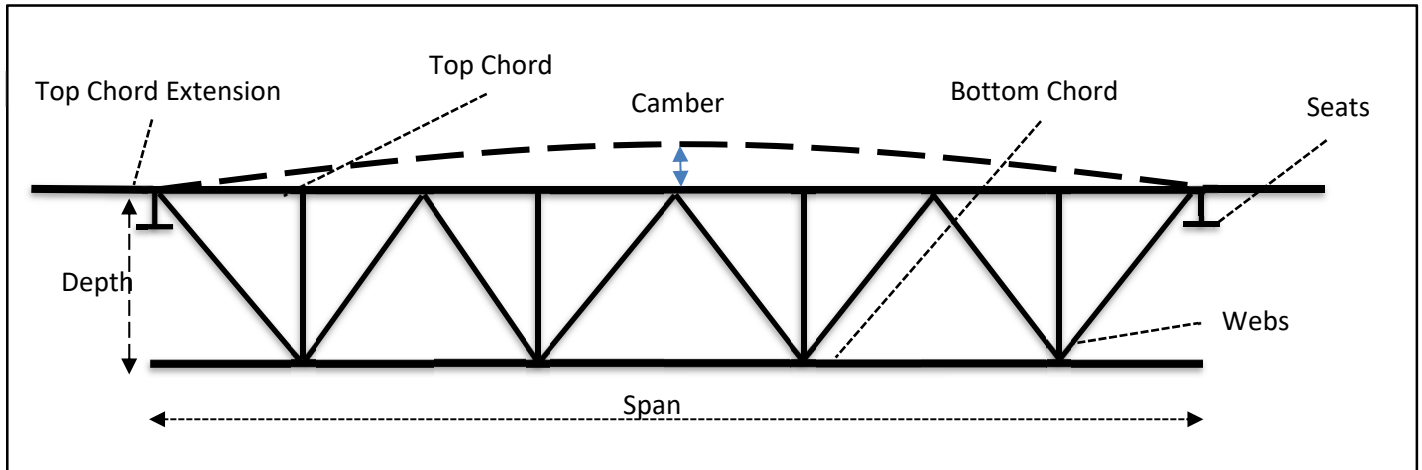


Figure 4.2 Joist drawing

The joist assembly operation consists of:

- reading and understanding the plans;
- identification of the steel elements that will build the joist;
- identification of the positions of the elements on the joist;
- lifting and placing the top and bottom chords on the assembly table;
- lifting and positioning of joist components;
- welding of joist elements;
- final check;
- removing the assembled joist.

An automatic device is installed on the joist assembly table to measure the assembly time. Each time the beam elements arrive on the assembly table for the first time, the automatic device starts counting the assembly time. The counting will stop when the assembly table becomes empty again. This feature reduces human intervention in starting the countdown. However, the device does not stop when, leaving the joists on the assembly table, the workers go on a break or weekend.

#### 4.5.2 Data understanding

The data for this study come from the main variables that characterize the joists.

- **Depth** (mm) is the vertical distance between the axis of the top and bottom chords
- **Span** (mm) is the distance between the two positions of the joist seats
- **Camber** (mm) is the distance between the highest point before, and after bending, the camber is imposed on the upper chords to keep the joist horizontal when loaded
- **ComponentCount** (qty) is the number of elements
- **Memb\_Lgth** (mm) is the total length of all its elements
- **Weight** (Weight(kg)) is the total mass of the features that make up the joist
- **ChordsDis** (binary) is to check if the top and bottom chords are different or not in profile types and dimensions
- **ReinfWeight** (mm) is the weight of the additional materials used to reinforce the joist elements
- **Tcs\_Lgth\_l** (mm) is the extension length to the left of the top chord
- **Tcs\_Lgth\_r** (mm) is the extension length to the right of its top chord
- **Tcx\_Depth\_l** (mm) is the depth of the profile used for the left extension of the top chord
- **Tcx\_Depth\_r** (mm) is the depth of the profile used for the extension to the right of the top chord
- **TcxType\_x** (from type1 to type8)) is the type of top chord used to manufacture the joist
- **Dsg\_type** (from type 1 to type 4) is the type of joist design used

#### 4.5.3 Data preparation

*Data cleaning:* More than 170,000 assembly times were recorded corresponding to more than 170,000 joists. However, these data contain noise. The noise is mainly due to inattention errors

by workers, joists remaining on tables during breaks, weekends, and holidays. To reduce the noise in the data set, this study proposes to obtain from the workers the maximum and minimum time to assemble a joist on the assembly table. This technique consists in excluding from the study, the times too short or too much to correspond to time for assembling the beams. A maximum time of 25 minutes and a minimum time of 5 minutes are obtained from professionals. These times will be retained as the minimum and maximum limits of the assembly times retained for the study. This technique will reduce the data by 170,000 for 55,444 (see Figure 4.3).

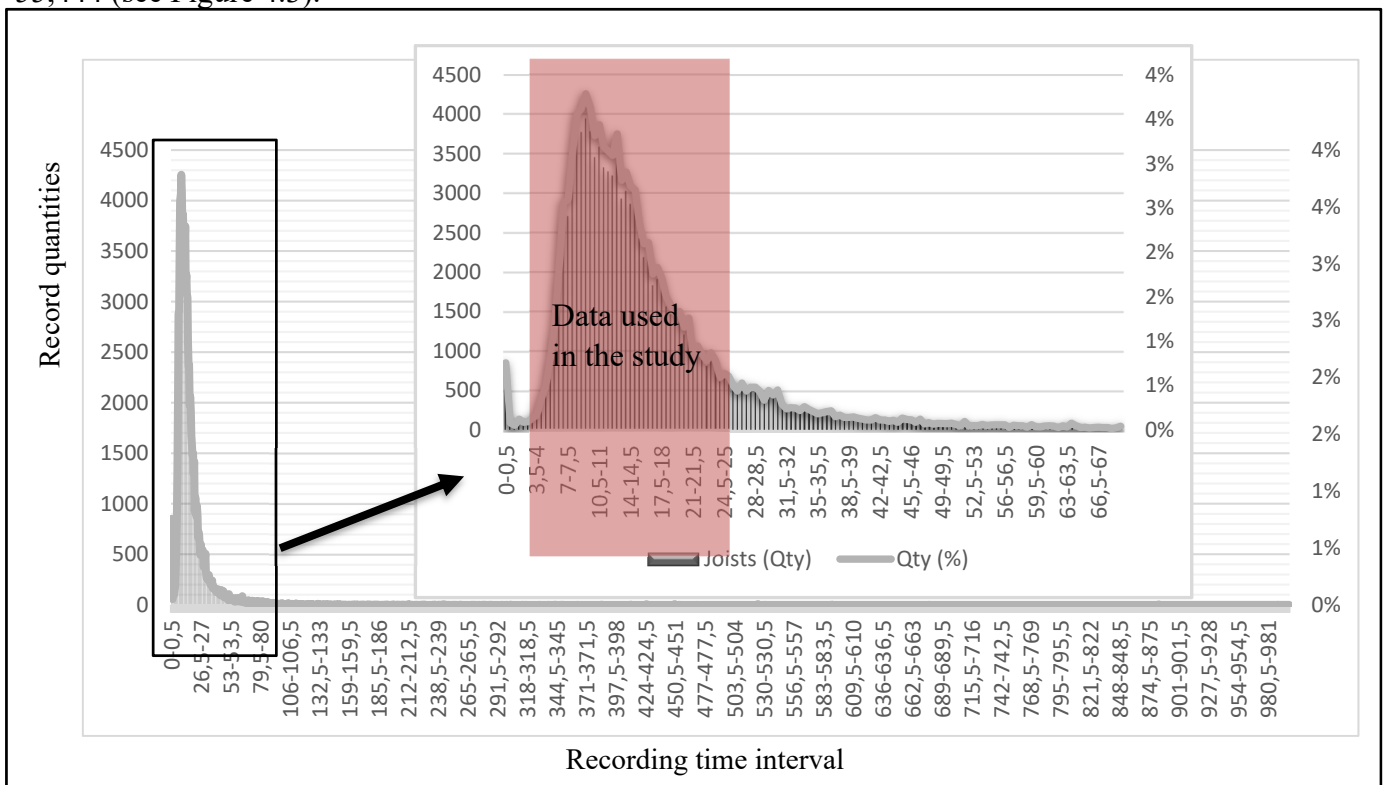


Figure 4.3 Data distribution for the study

*Data splitting* We programmed an algorithm that allowed us to split the cleaned data into four groups, with similar statistical characteristics (mean, minimum (min), the first quartile (25%), the median (50%), the third quartile (75%), the maximum (max), and the standard deviation (std), as seen in Tables 4.1, 4.2 and 4.3. These measures ensure that the data is well distributed among the four groups. Three of these groups were used for training the learning algorithms and the fourth for testing them.

Table 4.1 Statistical characteristics of the first quarter of data

	Depth	Span	Camber1	ComponentCount	Memb_Lgth	Weight	RealTime
count	13861,0	13861,0	13861,0	13861,0	13861,0	13861,0	13861,0
mean	634,8	9084,4	16,2	22,0	53595,9	152,3	13,1
std	145,8	2803,9	7,2	5,3	18161,9	84,4	4,4
min	400,0	2120,0	0,0	8,0	12045,5	25,8	5,0
25%	508,0	7080,0	11,5	17,0	40344,6	92,7	9,7
50%	609,6	8737,6	15,9	23,0	51156,2	129,9	12,4
75%	750,0	10845,8	20,8	26,0	65284,1	189,7	15,8
max	915,0	18694,4	114,6	68,0	218027,3	1063,8	25,0

Table 4.2 Statistical characteristics of the second-quarter of data

	Depth	Span	Camber1	ComponentCount	Memb_Lgth	Weight	RealTime
count	13861,0	13861,0	13861,0	13861,0	13861,0	13861,0	13861,0
mean	634,8	9088,5	16,2	22,0	53596,5	152,5	13,1
std	145,6	2763,4	7,0	5,2	17795,0	82,0	4,4
min	355,6	1917,7	0,0	8,0	11600,9	22,5	5,1
25%	508,0	7112,0	11,5	17,0	40427,4	93,6	9,7
50%	609,6	8763,0	15,9	23,0	51228,6	131,9	12,4
75%	750,0	10850,0	20,7	26,0	65255,6	190,8	16,0
max	915,0	18694,4	87,3	68,0	218027,3	1042,0	25,0

Table 4.3 Statistical characteristics of the third-quarter data

	Depth	Span	Camber1	ComponentCount	Memb_Lgth	Weight	RealTime
count	13861,0	13861,0	13861,0	13861,0	13861,0	13861,0	13861,0
mean	634,0	9089,9	16,1	22,0	53613,5	153,0	13,1
std	146,8	2798,6	7,2	5,3	18165,2	84,0	4,4
min	400,0	2104,0	0,0	8,0	12638,5	23,7	5,0
25%	508,0	7061,2	11,5	17,0	40132,6	93,0	9,7
50%	609,6	8755,0	16,0	23,0	51191,5	130,8	12,3
75%	750,0	10782,0	20,6	26,0	65156,9	192,3	15,9
max	915,0	18694,4	127,0	56,0	181796,0	1137,5	25,0

Table 4.4 Statistical characteristics of the fourth-quarter data

	Depth	Span	Camber1	ComponentCount	Memb_Lgth	Weight	RealTime
count	13861,0	13861,0	13861,0	13861,0	13861,0	13861,0	13861,0
mean	634,3	9097,5	16,2	22,1	53640,2	152,9	13,1
std	145,8	2788,6	7,1	5,3	17969,3	83,6	4,4
min	400,0	2105,0	0,0	8,0	11707,6	23,5	5,0
25%	508,0	7105,7	11,5	17,0	40469,4	93,1	9,7
50%	609,6	8790,0	15,9	23,0	51380,4	131,4	12,4
75%	750,0	10750,0	20,5	26,0	64843,2	190,9	15,9
max	915,0	18440,4	90,0	56,0	181796,0	786,0	25,0

#### 4.5.4 Modeling

Three algorithms (GBR, RFR, and Lasso) are used for the prediction of the manufacturing time. The results of this modeling are as illustrated in Tables 4.5, 4.6 and 4.7.

Table 4.5 Prediction results with GBR

Categories	Number of Items	Real time	Prediction	GBP	Rae	Mae
0-15	1502	16153	16073	0,5%	0,94	3,14
15-20	5672	61873	62109	-0,4%	0,92	2,89
20-25	11129	127439	127217	0,2%	0,93	2,97
25-30	12827	157715	158419	-0,4%	0,92	2,97
30-35	9650	129735	129484	0,2%	0,92	2,97
35-40	6212	91654	91743	-0,1%	0,93	2,85
40-45	4726	73934	73734	0,3%	0,93	2,71

Table 4.5 Prediction results with GBR (continuation)

Categories	Number of Items	Real time	Prediction	GBP	Rae	Mae
45-50	2159	37050	36993	0,2%	0,94	2,57
50-55	1172	21542	21411	0,6%	0,92	2,44
55-60	322	6507	6433	1,1%	1,01	2,30

Table 4.6 Prediction results with RFR

Categories	Number of Items	Real time	Prediction	GBP	Rae	Mae
0-15	1502	16153	16258	-0,7%	0,98	3,27
15-20	5672	61873	62136	-0,4%	0,94	2,96
20-25	11129	127439	127970	-0,4%	0,95	3,06
25-30	12827	157715	158221	-0,3%	0,94	3,02
30-35	9650	129735	129902	-0,1%	0,94	3,03
35-40	6212	91654	91731	-0,1%	0,96	2,95
40-45	4726	73934	73700	0,3%	0,95	2,77
45-50	2159	37050	37057	0,0%	0,96	2,62
50-55	1172	21542	21423	0,6%	0,94	2,49
55-60	322	6507	6438	1,1%	1,06	2,40

Table 4.7 Prediction with Lasso

Categories	Number of Items	Real time	Prediction	GBP	Rae	Mae
0-15	1502	16153	19644	-22%	1,27	4,27
15-20	5672	61873	74182	-20%	1,26	3,96
20-25	11129	127439	145548	-14%	1,16	3,74
25-30	12827	157715	167755	-6%	1,06	3,40
30-35	9650	129735	126209	3%	0,99	3,19
35-40	6212	91654	81243	11%	1,03	3,17
40-45	4726	73934	61807	16%	1,16	3,38
45-50	2159	37050	28236	24%	1,60	4,35
50-55	1172	21542	15328	29%	2,05	5,46
55-60	322	6507	4211	35%	3,20	7,28

For Tables 4.5, 4.6 and 4.7:

- categories represent the range of lengths in feet to which the items belong;
- number of items represents the number of registered joists belonging to a category;
- real time is the sum of the recorded assembly times of the joists corresponding to a given category;
- prediction is the sum of the predicted times of the beams corresponding to a given category;
- the GBP, Rae, and Mae measurements are the measures that allow the evaluation of the joists by category according to the prediction technique used.

### 4.5.5 Evaluation

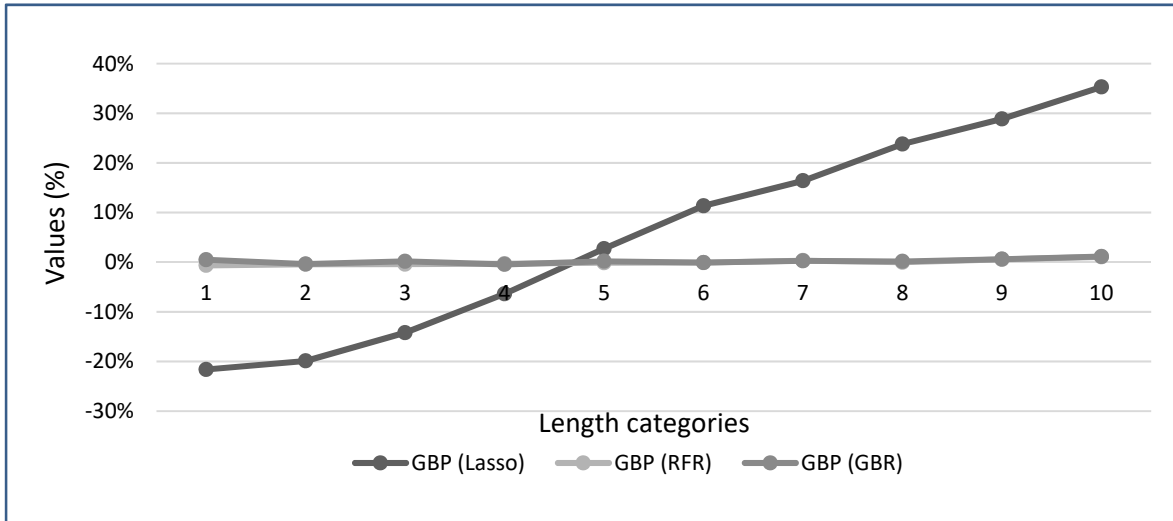


Figure 4.4 GBP comparison of Lasso, RFR, and GBR

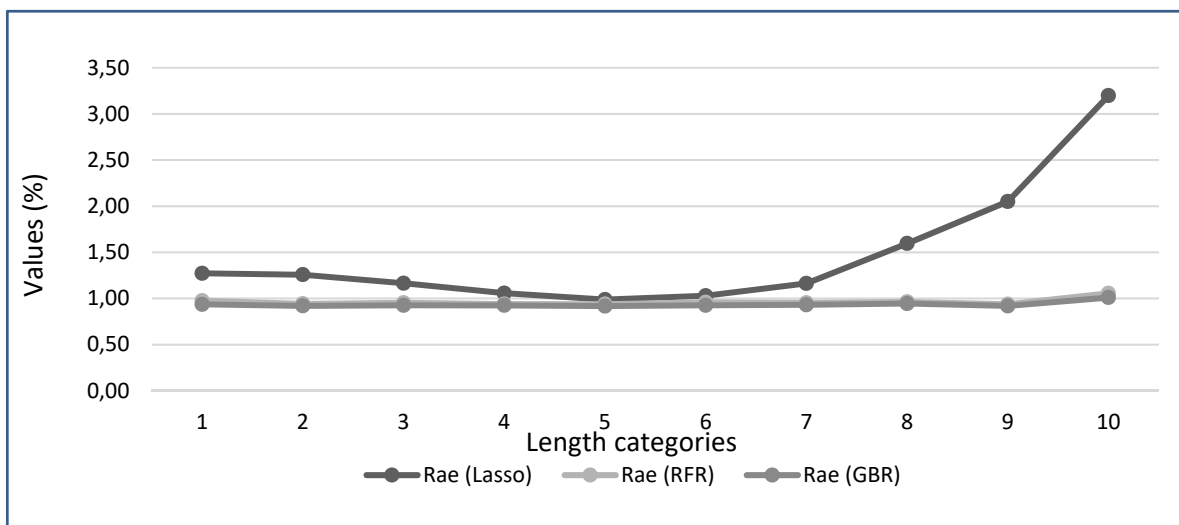


Figure 4.5 Rae comparison of Lasso, RFR, and GBR

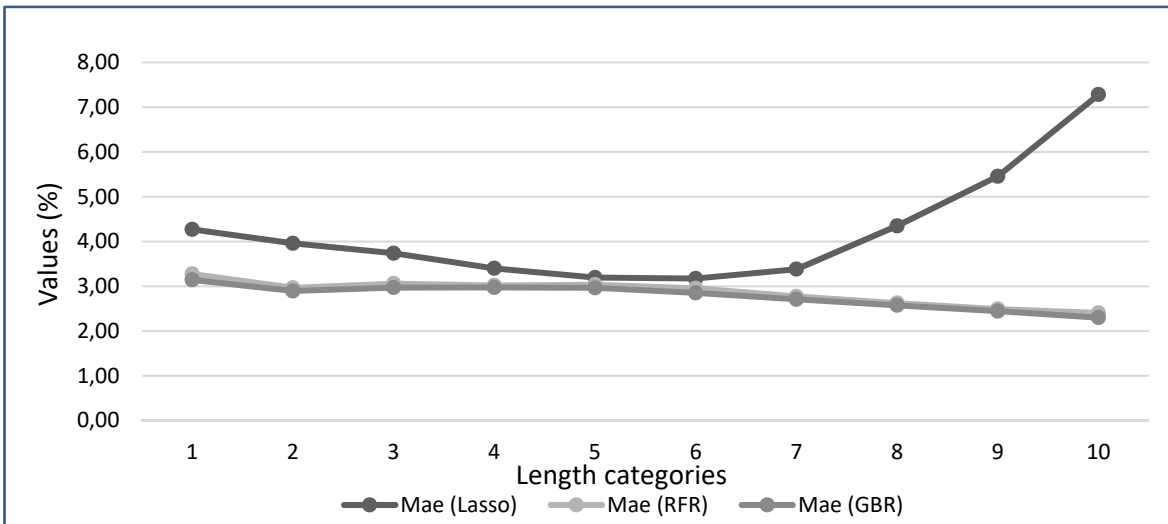


Figure 4.6 Mae Comparison of Lasso, RFR, and GBR

From Tables 4.5, 4.6 and 4.7 and from Figures 4.4, 4.5, and 4.6, the following observations are made.

For the choice of the best algorithm.

- The GBP obtained from the prediction results with the Lasso algorithm range from -22% to 35%, while the GBP obtained from the prediction results with the RFR and GBR algorithms range from -0.7% to 1.1% for the RFR and -0.4% to 1.1% for the GBR respectively, see Tables 4.5, 4.6 and 4.7, and Figure 4.4. Taking into account that the GBP of ideal prediction results is very close to 0%. Thus, from the GBP point of view, the GBR and RFR algorithms provide more accurate prediction results than the Lasso algorithm
- Also, the Rae obtained from the prediction results with the Lasso algorithm range from 0.99 to 3.20, while the Rae obtained from the prediction results with the RFR and GBR algorithms range from 0.94 to 1.06 for RFR and 0.92 to 1.01 for GBR respectively, see Table 4.5, 4.6 and 4.7, and Figure 4.5. Taking into account that the Rae of the ideal prediction results is very close to 1. Thus, from Rae's point of view, the GBR and RFR algorithms provide more accurate prediction results than the Lasso algorithm
- Finally, the Mae obtained from the prediction results with the Lasso algorithm vary between 3.17 and 7.28, while the Mae obtained from the prediction results with the

RFR and GBR algorithms vary between 2.40 and 3.27 for the RFR and 2.30 and 3.14 for the GBR respectively see Table 4.5, 4.6 and 4.7, and Figure 4.5. Taking into account that the Mae of the results of an ideal prediction is very close to 0. Thus, from Mae's point of view, the GBR and RFR algorithms provide more accurate prediction results than the Lasso algorithm

- The GBR and the RFR present results with almost identical GBP, Rae, and Mae
- The prediction times from the GBR and RFR are so close to real-time that their representative lines are overlaid see Figure 4.7

Thus, The Lasso shows poor results compared to the other algorithms used in this article. The GBR and the RFR will be used in this article for the pattern identification.

Also.

- For the RFR, below 1,502 items, the GBP are higher than 0.65%, while for the GBR, GBP greater than 0.61 are observed below 1,172 items. This may indicate that prediction with the GBR technique does not require large amounts of data to provide accurate results
- The highest RAEs (-1.05 for RBR and -1.14 for GBR) correspond to the category with the lowest number of items. This can be explained by the fact that ML prediction results are more accurate when more data are available (Lantz, 2015a ; Raschka et Mirjalili, 2019)

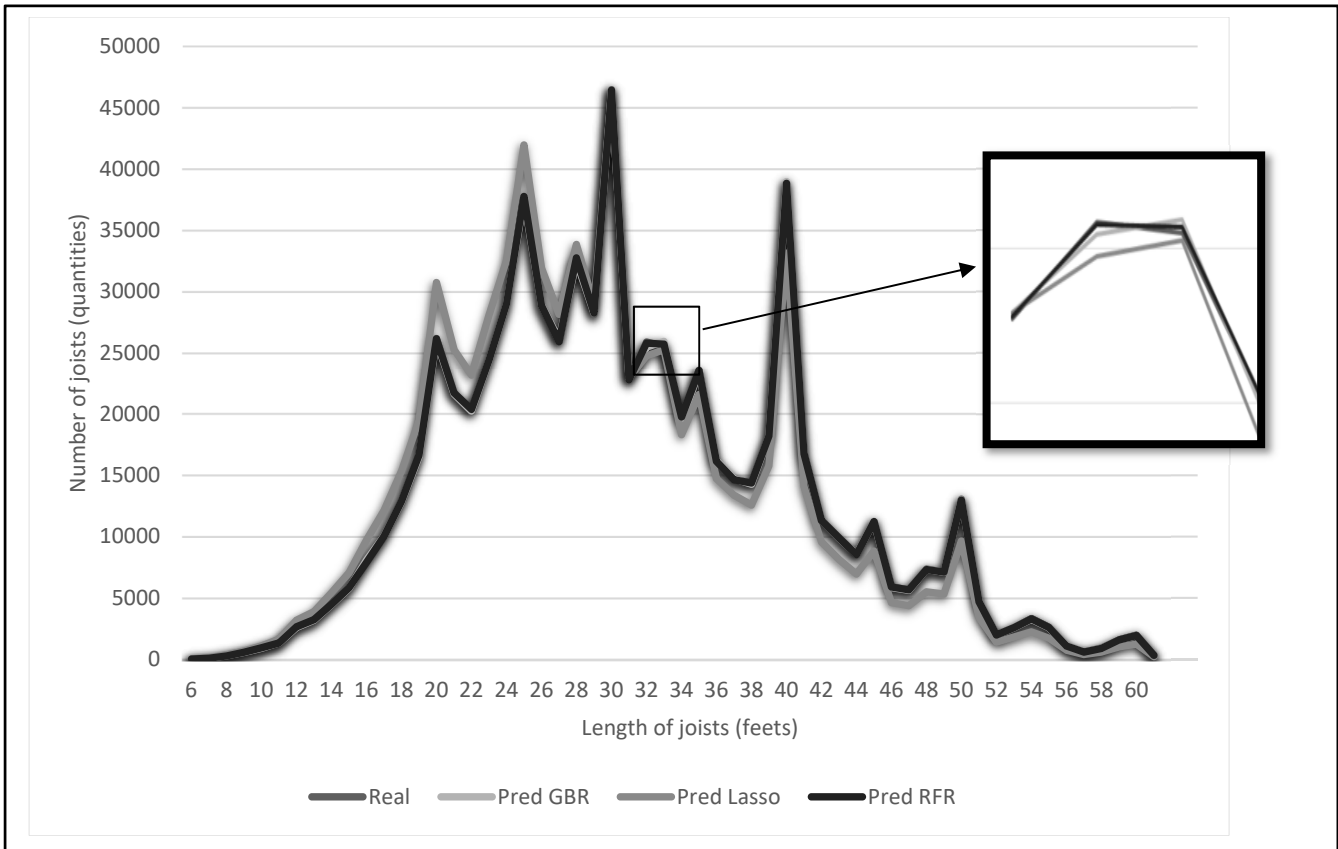


Figure 4.7 Comparison of prediction models

#### 4.5.6 Pattern identification

Once the modeling is done, GBR and RFR allow for processing the pattern identification. Pattern identification proposes to identify variables that have a substantial impact on the prediction results. This functionality is available on both the GBR and the RFR see Figure 4.8.

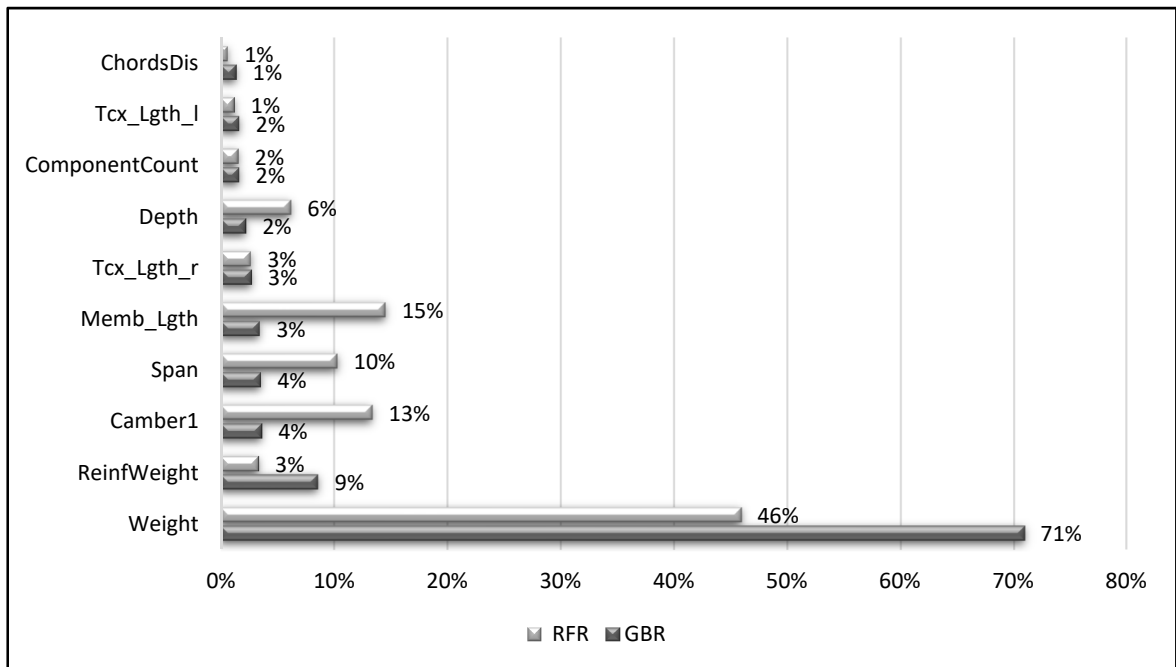


Figure 4.8 Feature importance

According to Figure 4.7, the following remarks are made:

- for both prediction techniques, the variables Weight, ReinfWeight, Camber, Span, Memb\_lgth, Tcx\_Lgth\_r, and Depth, are the variables that have the most impact on the joist assembly time;
- for both prediction techniques, joist weight is the variable with the most significant effect on assembly time.

#### 4.5.7 Knowledge learned and Design Rules

After the pattern identification, the following information is retained:

- the joist weight greatly influences the joist assembly time. This may indicate a difficulty in lifting and handling heavy elements on the assembly table. Improving the assembly line by installing additional lifting equipment could result in a considerable reduction in joist assembly time;
- the length of the members and the height of the joists also have a significant impact on the assembly time of the joists. This may indicate difficulty in maneuvering the long bars on the assembly table. A system for handling thin bars can considerably reduce joist assembly time;
- extensions on the right side of the joist top chords have a more significant impact on joist assembly time than on the left side. This may indicate a difficulty in symmetrical work on the joist assembly table. Symmetrically equipping the assembly table can reduce joist assembly time.

Also, some design rules can be derived from this pattern identification:

- the ReinfWeight (the weight of the additional materials used to reinforce the joists elements) has a significant impact on the assembly time of the joists. For example, avoiding the use of reinforced bars by replacing them with larger profiles can significantly reduce joist assembly time;

- joist length has an impact on joist assembly time, but the number of joist components does. Designing joists that can be assembled in subassemblies will undoubtedly increase the number of components but may reduce joist assembly time;
- the length of joist members has a considerable impact on assembly time. Fragmenting the length of joist parts such as top and bottom chords during design can reduce joist assembly time;
- top chord extensions to the right have more impact on joist assembly time than extensions to the left. Matching joists so that top chord extensions can be made to the left during joist assembly before being flipped to the right can reduce joist assembly time.

#### **4.6 Perspectives**

After defining some design rules, it would be interesting to implement these rules on the design of some joists to appreciate the impact of these rules on the assembly time of the joists.

Also, it should be noted that, as in the DFMA, some design rules for joist assembly can be opposed to design rules related to other phases of the joist life cycle (Boothroyd, 1994). Thus, identifying variables with a high impact on other stages of the joist life cycle, and comparing them with the results opted for in this study is a proposed perspective for this study.

#### **4.7 Conclusion**

This work proposes a quantitative approach to identify the criteria that influence the assembly time of joists in a particular production process. To achieve this, this research suggests extracting and classifying data from BIM models of joists and using a predictive regression model to predict assembly time. Ensemble learning algorithms (RFR and GBR) proved to be better predictors than non-ensemble learning (Lasso). Furthermore, both ensemble learning

algorithms were able to identify the most input variables. Based on these variables, it was possible to formulate recommendations concerning the assembly line and formulate design rules. A case study with 55 444 steel Joists demonstrates the feasibility of this method. Variables are classified according to their impact on the assembly time. The study also proposes a series of relevant variables that could inspire future work in predicting manufacturing duration in steel joists projects in a specific workshop. The methodology proposed in this study can also be adapted to other productive sectors of the construction industry, such as steel structures installation, glass fabrication, and installation. For each of these applications, it will be necessary to get BIM models of previous projects and the duration of operations of these projects. Also, the data must come from a single production unit. A practical perspective for this study will be to apply the design rules developed on the design of new joists to be realized in these same workshops, to appreciate the impact of these rules on the manufacturing time of the structures.

## CHAPITRE 5

### A QUALITATIVE APPROACH TO IDENTIFY DESIGN GUIDELINES TO REDUCE THE FABRICATION DURATION OF STRUCTURAL STEEL COMPONENTS

Mathieu Fokwa Soh <sup>a</sup>, Daniel Barbeau <sup>b</sup>, Sylvie Doré <sup>a</sup>, Daniel Forgues <sup>a</sup>.

<sup>a</sup> Département de Génie de la construction, École de technologie supérieure,  
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3.

<sup>b</sup> Groupe Canam - Centre administratif, 270 Chemin du Tremblay, Boucherville,  
Québec J4B 5X9

Article soumis pour publication dans « Construction Management and Economics »  
Juillet 2021.

#### 5.1 Abstract

**Purpose** – This work proposes design guidelines to reduce structural steel components' fabrication duration. The research is organized so as to function within the "Design Bid Build" project delivery method, where designers do not always know the factors that have a strong impact on the cost and duration of the fabrication process. Making design decisions without considering these fabrication factors contributes to delays, waste and loss of quality. This problem is addressed by identifying the factors that affect fabrication duration and then formulating design guidelines to reduce that duration.

**Design/methodology/approach** – The method is qualitative. It relies on semi-structured interviews to identify fabrication factors, and on focus groups to formulate design guidelines.

**Findings** –This research identifies 20 factors with a high impact on fabrication duration, 33 design guidelines to reduce fabrication duration and 17 reasons why designers do not consider fabrication factors as a way to reduce the fabrication duration of structural steel components.

**Originality/Value** – In this article, designers and fabricators of structural steel components contribute to identifying fabrication factors and to the formulation of design guidelines. This research also highlights the difference between the factors identified in the literature and those identified by professionals.

**Keywords:** design guidelines, design phase, fabrication factors, steel construction project, qualitative methods.

## 5.2 Introduction

In steel construction projects, the raw material procurement, fabrication and erection phases account for 70 to 95% of the projects' overall cost, while the design phase accounts for only 1-2% (Carter et Schlafly, 2008 ; Yang et Chan, 2018). However, with an impact of more than 88% on the overall cost of steel construction projects (Evers et Maatje, 2000 ; Kovacic et Zoller, 2015), decisions made during the design phase almost completely control the total cost and duration of projects (Gao et al., 2018). These decisions mainly concern strength calculations (Heinisuo, Laasonen et Haapio, 2010) and compliance with applicable standards (Schmidt et al., 2018). Evaluating the fabrication feasibility or fabrication alternatives for a designed model only occurs at the end of the design phase (Barg, Flager et Fischer, 2017). Designers spend just a few minutes checking the feasibility of the fabrication of the designed products. This evaluation is usually based on the total weight of the structures (Haapio, 2012) and the characteristics of the profiles used (Watson *et al.*, 1996 ; Pavlovčič, Krajnc et Beg, 2004) to minimize costs and project duration. Designers conducting these evaluations do not always have sufficient knowledge of and experience with the fabrication phases (Jonasson, Mikaelsson and Persson, 2020). This process results in a sub-optimally designed product that

does not consider the factors of other phases of the project (Forgues et Iordanova, 2010), resulting in waste and loss of productivity (Egan, 1998 ; Crotty, 2012 ; Sacks *et al.*, 2018).

In Product Development Engineering (PDE), designers take into account downstream phases through various design methods such as Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) (Boothroyd, 1994). DFMA is a methodology for evaluating and improving products by considering the designed product's manufacturability and ease of assembly (Staub-French *et al.*, 2018 ; Alfieri *et al.*, 2020), and can result in manufacturing and assembly cost reductions of more than 57% (Ashley, 1995).

In the steel construction industry, fabrication operations involve machining (cutting, drilling, grinding, etc.) and assembly (bolting, welding, tacking, etc.) (Bangash, 2000). Therefore, unless mentioned otherwise, the term fabrication in the following paragraphs will encompass both machining and assembly. The first step in applying DFMA in the steel construction industry requires the identification of all the fabrication factors. These factors are everything that can enable an organization or a process to achieve its objectives in the most efficient way possible (Goldratt, 1990). Fabrication factors are the characteristics of a product or fabrication plant that must be considered for on-time and cost-effective fabrication. Identifying fabrication factors is essential to reducing the duration, and therefore the cost, of the fabrication of steel components. Somewhat surprisingly, there are very few works on identifying fabrication factors in the literature.

This research seeks to find ways to reduce structural steel components' fabrication duration and suggests identifying fabrication factors to accomplish that. While cost is the driving factor in DFMA, duration is considered in this study because the fabrication cost is always relative to the fabrication duration. Almost always, the fabrication cost is mainly due to some highly variable items, such as the workers' hourly wage and the equipment's depreciation cost.

The next section builds an argument for adapting DFMA to reduce the fabrication duration of structural steel components, and is followed by an explanation of the methodology utilized. Section IV presents a case study conducted with a steel structure fabricator. The results of this case study are then analyzed and discussed in the last section.

## 5.3 Background

### 5.3.1 DFMA principles to improve steel construction projects.

During the Second World War, the first principles of DFMA were applied by Ford and Chrysler to reduce waste caused by design decisions during the production of war machines (Lu *et al.*, 2020). The first formal approaches to design for manufacturing (DFM) and design for assembly (DFA) appeared in the 1960s, and considered manufacturing and assembly factors, respectively, during the design phase. Boothroyd (1994) developed DFMA in the manufacturing industry to simultaneously consider the factors of fabrication and assembly of parts during their design phases.

One of the principles of DFM is to reduce manufacturing constraints by simplifying part shape (Wood *et al.*, 2001), while one of the main DFA principles is to reduce the number of parts, which can lead to parts becoming more complex (Stoll, 1986). Applying DFM and DFA together can obviously lead to conflicts. This dilemma can be solved by advanced analysis methods that allow designers to choose better initiatives, which in turn tend to reduce the targeted parameters (reduced costs and/or reduced fabrication and assembly time).

The manufacturing industry adopted DFMA to address fabrication and assembly difficulties that arose during the traditional ("over-the-wall") design and manufacturing process (Boothroyd, 1994). This "over-the-wall" process consists of considering the design and manufacturing stages as independent, consecutive and isolated. This process creates huge (and unnecessary) waste during the fabrication and assembly phases (Boothroyd, 1994 ; Gao, Low *et Nair*, 2018). The implementation of DFMA in the manufacturing industry has reduced waste, increased quality, and simplified products and their assembly (Lu *et al.*, 2020).

The "over-the-wall" process that motivated the implementation of DFMA in the manufacturing industry can be identified with the Design Bid Build (DBB) process that the construction industry still faces today. Indeed, DBB is mainly characterized by low productivity resulting from a significant separation between designers and contractors (fabricators, builders, etc.) (Mohd *et al.*, 2014). We posit that applying DFMA principles in construction, and more

specifically in the steel construction industry, can reduce waste during the fabrication phase, as has been the case in the manufacturing industry.

### **5.3.2 Design guidelines for steel fabrication processes**

There are three ways of applying DFMA (Bogue, 2012). The first way is consistent with the original use of DFMA and proposes a set of rules or design guidelines to minimize a specific performance criterion, such as the cost or duration. The second way was suggested by Boothroyd (1992). It consists of proposing a quantitative evaluation of the designed product based on the rules/guidelines. Each part of the designed product is rated according to the difficulties during its fabrication and assembly. The third way is the most recent. It consists of automating the whole process using computer software (Bogue, 2012). It would not be easy to apply the second or the third DFMA approaches in steel construction projects. In fact, before going to an analysis stage, it is necessary to uncover the guidelines that allow the fabrication of structures in the shortest possible time, at the lowest possible cost. To do this, it is essential to identify the factors that impact structural steel components' fabrication duration and then to formulate appropriate design guidelines. That knowledge and those guidelines can then be incorporated into analysis software and even automated. This article is focused on the fabrication factor identification and design guideline formulation.

Numerous works (Swift et Brown, 2003 ; Bogue, 2012 ; Stoll, 1986 ; Emmatty et Sarmah, 2012) propose design guidelines in the manufacturing industry. Banks et al. (2018), Chen and Lu. (2018) and Kim et al. (2016) used these design guidelines in the steel construction industry to consider fabrication and assembly factors during the design phase. These guidelines mainly address error reduction and the standardization and minimization of the processes and tools (see Table 5.1).

Table 5.1 Manufacturing guidelines in steel construction literature

Items	Design guidelines	(Banks <i>et al.</i> , 2018)	(Chen et Lu, 2018)	(Kim <i>et al.</i> , 2016)
<b>Standardization of processes and tools</b>				
1-1	Standardize the parts used			x
1-2	Use automatic systems	x		
<b>Minimization of processes and tools</b>				
1-3	Simplify the product			x
1-4	Reduce the number of parts	x	x	x
1-5	Use cost-effective materials		x	x
1-6	Use handy parts size		x	
1-7	Use prefabricated elements	x		
1-8	Reduce site work	x		
<b>Reduction of errors</b>				
1-9	Facilitate product orientation			x
1-10	Reduce the number of equipment/tools		x	
1-11	Reduce waste	x		

The design guidelines identified in the literature are somewhat generic and provide designers with very general knowledge for efficient manufacturing processes. However, there are many differences between manufacturing and steel construction. In the steel construction industry, fabrication plants, cultures, and professional experience vary from project to project. Equipment is renewed regularly to accommodate increasingly complex fabrication and assembly operations, as well as to meet ever more stringent environmental and human safety regulations. Steel construction projects are never identical in volume, weight, location complexity and timing. Applying generic design guidelines from the manufacturing industry may not result in the best solution for the steel construction industry. Identifying fabrication factors specific to the steel construction industry will help formulate more targeted design guidelines to reduce fabrication duration.

Hu et al. (2014), Mohsenijam & Lu (2016), and Fokwa Soh et al. (2018, 2020) have proposed factors to consider when predicting the fabrication duration of structural steel components in North America (see Table 5.2). The factors proposed by these authors are identified either by linear regressions or by using qualitative analysis on RFIs.

Table 5.2 Factors affecting the fabrication duration of steel structures identified in the literature

items	Factors	(Hu, Lu et AbouRizk, 2014)	(Mohsenijam et Lu, 2016)	(Fokwa Soh et al., 2018 ; Soh et al., 2020)
2-1	Total volume (Length)			X
2-2	Total length (Length)			X
2-3	I-Beam (Length)		X	
2-4	Wide Flange Beams (Length)	X	X	
2-5	Channels (Length)	X		
2-6	Standard Pipe (Length)	X		
2-7	Hollow Steel Sections (Length)	X	X	
2-8	Equal or Unequal Legs (Length)	X		
2-9	Plate (Length)		X	
2-10	Complete penetration weld (Length)		X	
2-11	Partial penetration weld (Length)		X	
2-12	Type Bolts (Quantity)	X	X	
2-13	Hex Nuts (Quantity)	X		
2-14	Number of holes (Quantity)			X
2-15	Number of connection (Quantity)			X
2-16	Number of parts (Quantity)			X
2-17	Number of parts with cambering (Quantity)			X
2-18	The difference in volumes between pieces (Quantity)			X
2-19	Steel weight (Weight)		X	X

As with the manufacturing design guidelines proposed in the literature in Table 5.1, the fabrication factors identified in Table 5.2 are generic, even though they are for the steel construction industry, and can be used as codes in qualitative research with steelwork professionals to identify fabrication factors that will allow the formulation of design guidelines. The following method is proposed for this purpose.

#### **5.4 Design of the research**

The research methodology is built around one case study conducted with a major North American steel components fabricator.

Qualitative methods were adopted for this research: semi-structured interviews were used to identify fabrication factors with this company's designers and fabricators. A focus group involving both designers and fabricators was then set up to formulate design guidelines based on these factors (see figure 5.1).

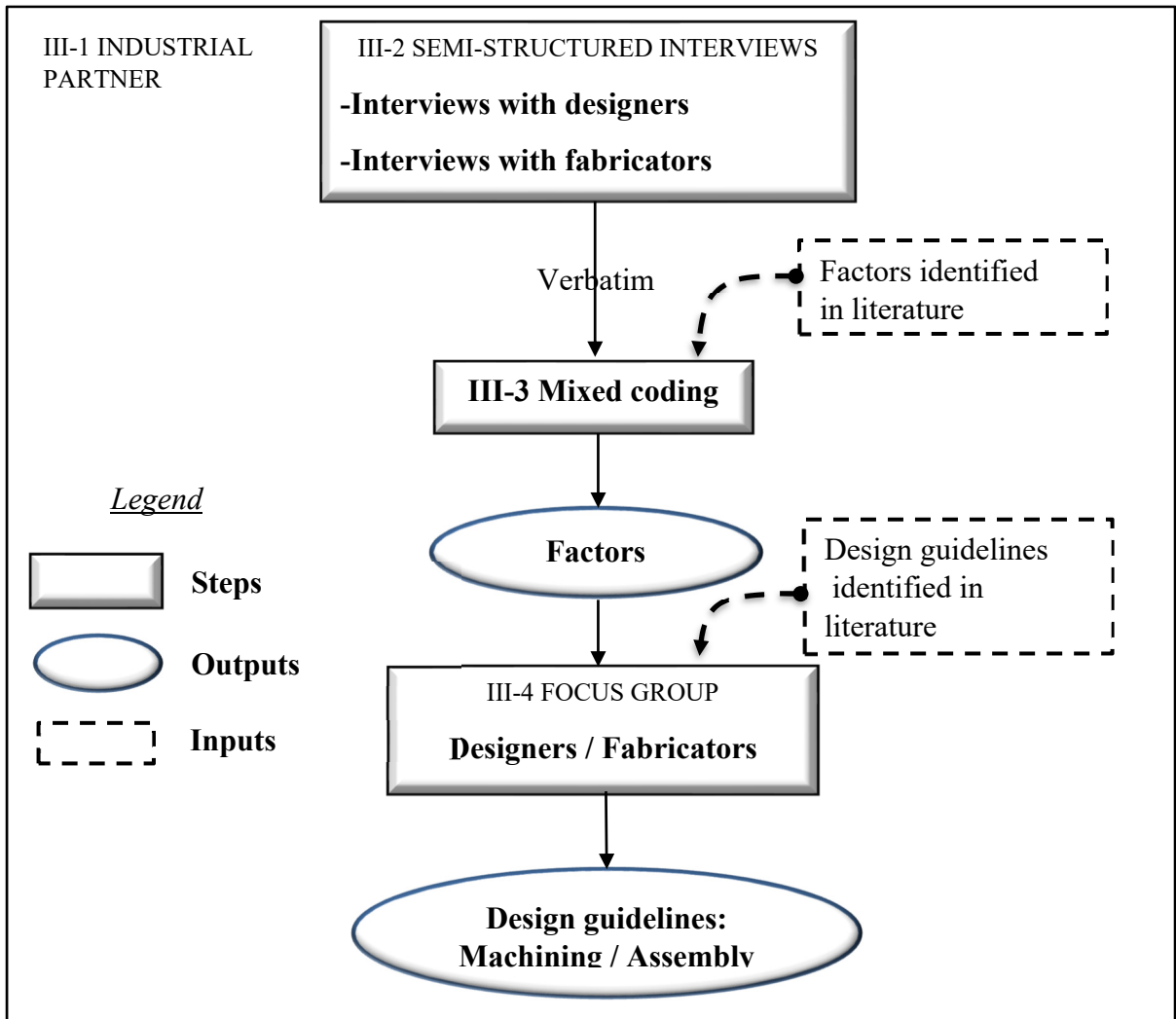


Figure 5.1 Research design for the study

#### 5.4.1 Industrial Partner

This industrial partner was chosen because it is a major North American steel components fabricator, with over 60 years of experience. In addition, this company has design offices and fabrication plants that operate independently to better serve a wide variety of customers in an industry that operates essentially on a DBB procurement method.

During steel construction projects, designers receive preliminary project concepts from clients or architects. Based on this information, the designers proceed to the detailed design of the structural components, which mainly consists of the choice of features (beams, columns, connections, bolts, type of welds etc.). This detailed design is communicated via detailed drawings that they produce and send to the fabricators. If the information contained in a detailed drawing is insufficient, unclear, or does not correctly account for the fabrication factors, the fabricators will send official information requests to ask for more information or propose modifications to the designers that will allow them to fabricate the components considering the fabrication context.

In some cases, designers may request the fabricators' participation during the design phase in order to have access to the fabrication phase's information. However, this process can lead to projects that take longer and incur higher costs. Therefore, identifying the fabrication factors and design guidelines of a company's factories would help them to reduce costs. This initiative will allow a company to offer completed projects to their customers in the best possible timeframe.

#### **5.4.2 Semi-structured interviews**

Semi-structured interviews were conducted individually with three designers and three fabricators, all employees and professionals with over 20 years of experience in the selected company. The interviews, each lasting between thirty and forty minutes, took place in the second quarter of 2020. The interviews' objectives were to allow participants to share their opinions, beliefs, and experience (Roulston and Choi, 2018) in relation to factors that significantly impact the fabrication duration of structural steel components. A minimum of six participants is required, because six is the minimum number for a focus group (Gill *et al.*, 2008). At the end of the interviews, a verbatim transcript was produced. These texts were key to the implementation of the coding process.

### **5.4.3 Mixed coding**

This study used mixed coding (Elliott, 2018), as some factors with a high impact on structural steel components' fabrication duration have already been proposed. The factors identified in the literature were used for closed coding, and open coding allowed for the emergence of new codes that would not have been identified by the methods used in the literature.

### **5.4.4 Focus group**

A focus group was conducted with the six professionals who participated in the semi-structured interviews. The focus group lasted four hours, with two ten-minute breaks and one twenty-minute break. It took place in the second quarter of the year 2020, after all the interviews were completed and coded. The focus group's objectives were to collectively validate the previously identified factors, classify the factors according to machining and assembly operations, and collaboratively formulate design guidelines based on the identified factors.

## **5.5 Results**

The case study conducted at the industrial partner allowed to obtain the following results:

### **5.5.1 Results of the semi-structured interviews**

Table 5.3 presents the factors identified during the semi-structured interviews. The "Factors from the literature" are those factors identified in the literature. The first number in this column represents the table number and the second number represents the line number corresponding to the factor present in the literature and shown in Table 5.2. The designations used here establish the correspondence with Table 5.2. The numbers in the "Designers" and "Fabricators" columns represent the total number of designers and fabricators, respectively, who mentioned the identified factors during the semi-structured interviews. The "Machining" and "Assembly" columns indicate the factors identified for machining and assembly, respectively, during the

focus group. Another group of factors emerged from the focus group. This is the "Causes" column, which indicates why the designers do not consider fabrication factors.

Table 5.3 Factors identified in this study

Items	Factors	Factors from Literature	Designers	Fabricators	Machining	Assembly	Causes
01	Cambering of steel girders	2-17	1	1	x		
02	Length of steel structures	2-2	3	3	x		
03	Weight of steel structures	2-19	1	3	x		
04	Space requirement for Fabrication tools		2	0	x		
05	On-site Fabrication		0	2	x		
06	Steel structure finishes		1	2	x		
07	No production follow-up		1	0	x		
08	Complex parts		1	2	x		
09	New projects		0	2	x		
10	Connection of steel structures	2-15	3	3		x	
11	Difference between parts	2-18	0	1		x	
12	Lack of standard		2	0		x	
13	Openings in steel structures		0	1		x	
14	Availability of the profiles used		2	3		x	
15	Errors in structural drawings		0	1			x
16	BIM Tool Limit		3	0			x
17	No knowledge of Fabrication processes		3	0			x
18	Unavailability of resources and skills		3	0			x
19	Customer changes		1	1			x
20	Type of contracts		2	0			x

### 5.5.2 Results of the Focus group.

Table 5.4 presents the design guidelines formulated by the focus group participants based on the fabrication factors in Table 5.3. These guidelines are classified according to their use in machining or assembly operations; the fabrication factors that inspired them are also listed. The column "design guideline in the literature" indicates the design guidelines found in the literature and gives their reference numbers for this work. The designations used here correspond with those in Table 5.1.

Table 5.4 Design guidelines to reduce the duration of fabrication of steel components in the chosen plant

types of operation	Factors	Items	Design guidelines	Design guidelines in literature
<b>Machining</b>	Cambering of steel girders	4-1	Reduce the number of cambered parts	
		4-2	Reduce connections on cambered parts	
	Length of steel structures	4-3	Design parts for structures smaller than the machining table	1-6
	Weight of steel structures	4-4	Favour the use of steel joists rather than beams	
	Space requirement for machining tools	4-5	Consider the dimensions of the assembly tools during the fabrication process	
		4-6	Consider the dimensions required for the welds identified during the design process	
	On-site fabrication	4-7	Reduce on-site operations during design	1-8
		4-8	Minimize the number of welds on site	
	Steel structure finishes	4-9	Plan the finishes at the end of the fabrication operations	
		4-10	Minimize finishing on the assembly site	
		4-11	Consider the dimensions of the paint chamber	
	No production follow-up	4-12	Consider the prerequisites of the machining operations	

types of operation	Factors	Items	Design guidelines	Design guidelines in literature
	Complex parts	4-13	Reduce the presence of complex parts as much as possible	1-3
		4-14	Use as much the same material as possible for the works	1-5
		4-15	Reduce the use of parts requiring special operations	1-3
		4-16	Use the same type of weld bead as possible during the design process	
		4-17	Minimize the number of welds	
		4-18	Design the most symmetrical steel structures possible	
		4-19	Minimize the use of spliced structures	
Assembly	Connection of steel structures	4-20	Reduce as much as possible the number of connections on the designed products	
		4-21	Reduce connections operation on site	1-8
		4-22	Take into account the connection accesses	
		4-23	Use the same type of bolts in the design of the connections	
		4-24	Allow for tolerances for the installation of the connections	
		4-25	Design the structures by clearly identifying the connections	
		4-26	Standardize connections	1-1
		4-27	Design the connections with one mounting direction (East-West, bottom up)	1-9
	Difference between parts	4-28	Reduce as much as possible the quantity of elements in the assemblies of structures	
	Lack of standard	4-29	Standardize the steel structural elements	1-1
		4-30	Standardize awnings and suspended panels	
	Availability of the profiles used	4-31	Consider the delivery time of parts during the design process	
		4-32	Consider the availability of parts during design	
Openings in steel structures	4-33	Design structures with the most identical openings possible		

The "Causes" factors identified above led to the initiatives listed in Table 5.5. The initiatives are classified according to the "causes" identified in the semi-structured interviews.

Table 5.5 Initiatives to help address and incorporate fabrication factors during the design phase

<b>Factors</b>	<b>Items</b>	<b>Initiatives</b>
Errors in structural drawings	5-1	Review the detailed plans of the structures
BIM Tool Limit	5-2	Work to enrich the BIM model to consider fabrication options
	5-3	Work to represent as much as possible the parts in 3D
No knowledge of fabrication processes	5-4	Provide designers with more time to learn steel fabrication practices.
	5-5	Train designers with the realities of fabrication plants
	5-6	Inform designers of the limitations of plant equipment
	5-7	Consider the experience and skills of the fabricators
	5-8	Integrate a system for rapid deployment of new standards
	5-9	Inform designers of new equipment and accessories available for the manufacture and assembly of structures
	5-10	Inform designers of the realities of fabrication plants
	5-11	Document the characteristics and specificities of the plants
Unavailability of resources and skills	5-12	Integrate people with fabrication experience during the design process
Customer changes	5-13	Work to consider additional client requirements during the design phase to avoid post-contract changes
	5-14	Inform customers about the impact of changes during the fabrication processes in the duration of the project
Type of contracts	5-15	Integrate partners in the design and fabrication processes of structures
New projects	5-16	Better document new projects
	5-17	Document new standards

## 5.6 Discussion

Of the twenty fabrication factors identified in this study (listed in table 5.3) only five correspond to factors identified in the literature – representing just a quarter of the factors identified. This low percentage may reflect the specificity of steel structure fabrication plants and the need to identify factors specific to each fabrication plant.

Before they can be of real, practical use, the factors identified in the literature require additional information from professionals. Indeed, when talking about the factors "Length of steel structures", "Weight of steel structures," and "Cambering of steel girders", the limits to respect for each of these factors must be known. These dimensions are specific to each plant and are among the basic information required to better understand the stated factors.

The types of profiles used, the lengths and the types of connections chosen in steel construction projects are decisions made by designers during structural calculations. However, the factors "Length of steel structures," "Connection of steel structures," and "Availability of the profiles used" are the factors cited most often, which emphasizes the need to incorporate the available profiles, maximum lengths, and suitable connection types into the structural calculations processes in order to reduce the fabrication duration.

Among the causal factors most identified by designers are "Unavailability of resources and skills" and "No knowledge of fabrication processes", both of which highlight the need for a method or process through which designers can obtain the required knowledge and skills, and/or have access to resources that provide detailed information about fabrication operations during the design phase.

A factor identified by all three designers is "BIM tool limits". Building Information Modeling (BIM) offers tools and processes to improve design practices and better manage building' construction projects (Eastman *et al.*, 2011). In the steel construction industry, BIM is primarily used to establish material quantities and coordinate construction processes (Robinson, 2007). The "BIM tool limits" factor identified by designers reflects their need to have BIM tools that integrate fabrication factors.

Of the 33 design guidelines for fabrication identified in this study and listed in Table 5.4, only nine correspond to the design guidelines specified in the literature and presented in Table 5.1. As with the fabrication factors listed in Table 5.3, the design guidelines identified in the literature correspond to almost a quarter of the design guidelines identified in this study.

Even though some of the proposed design guidelines are similar to guidelines proposed for the manufacturing industry by Stoll (1986), Swift (2000) and Bogue (2012), most of the design guidelines proposed in this study are very specific to the steel construction industry. This situation reflects the need to identify design guidelines for the steel construction industry.

Some design guidelines relating to machining operations seem to contradict design guidelines relating to assembly operation. Indeed, reducing on-site connections requires larger, more complex and (often) longer fabricated parts. To resolve this contradiction, we recommend choosing the design guidelines that will lead to the most significant reduction of fabrication (machining and assembly) duration, as in DFMA (Rodriguez-Toro, Jared et Swift, 2004).

Of the initiatives proposed to consider fabrication factors during steel structure design, no factors were identified in the literature. This lacuna may indicate that qualitative analyses are highly appropriate for identifying initiatives to better integrate fabrication factors during the design phase.

This case study has contributed to the identification of fabrication factors and helped formulate design guidelines that can be generalized to the steel construction industry or be specific to a chosen industrial context. Further case studies in other industrial contexts are necessary to verify if these results apply to the entire steel construction industry.

Steel construction projects do not end with the machining and assembly of steel components. Logistics, procurement and finishing are also critical operations in steel construction projects. In an essay on a construction industry's production theory, Koskela (2000) formulated the TFV theory, which postulates that construction projects are similar to raw material transformation, flow pulling, and customer value creation (Koskela, 2000). Thus, considering construction criteria as transformation (cutting, grinding, drilling, welding, etc.), flow (erection,

transportation, supply, deliveries etc.), and value (finishing, after-sales service, maintenance etc.) may allow the formulation of other relevant design guidelines to reduce the duration of steel structure construction projects.

## **5.7 Conclusion**

This article proposes to reduce the fabrication duration of steel structures by identifying design factors and formulating design guidelines. Qualitative analyses were conducted with designers and fabricators of steel structures employed by an industrial partner. These qualitative analyses made it possible to identify fabrication factors and to propose design guidelines.

This research identified 20 factors that significantly impact the fabrication duration of steel structures, 33 design guidelines to reduce the fabrication duration of steel structures, and 17 initiatives to consider for a better understanding and use of fabrication factors during the design of steel structure components.

This article reflects the need for designers to have current information regarding the machine capacities, steel section types and connection types available in structural steel fabrication plants. It also shows why designers must have access to the knowledge or resources related to structural steel fabrication operations as well as information about the BIM tools related to structural steel fabrication factors. In addition, this study indicates the advantages of identifying, through qualitative analysis, initiatives to promote the integration of fabrication factors during the design of steel structures.

The research developed in this article can be replicated in several other professions in the construction industry, such as curtain wall and wood structure fabrication.

A logical follow-up to this article would be to measure the impact of the design guidelines formulated in this study on the fabrication time of steel components. It would also be enlightening to replicate similar studies in other industrial contexts specific to steel construction, an effort that could verify if the fabrication factors and design guidelines proposed in this study are generic to the steel construction industry or specific to an industrial context. Finally, this article suggests formulating design guidelines that consider the transformation of raw materials, the traction of the flow and the development of customers'

value according to the theory of production in construction (TFV) formulated by Koskela (2000).



## CHAPITRE 6

### DISCUSSION DES RÉSULTATS ET LIMITES DU PROJET

#### 6.1 Rappel des prémisses

L'objectif de cette thèse était de formuler des règles de conception pour réduire la durée de fabrication des composantes de structures d'acier. Cette formulation s'est faite à partir des facteurs de fabrication identifiés à partir de trois méthodes exploitant trois sources de données à savoir les RFIs, les modèles BIM et le verbatim des entrevues avec les concepteurs et fabricants.

Les prémisses sur lesquelles cette thèse se fonde sont les suivantes :

**1<sup>er</sup> prémisses** : À l'instar de l'industrie du PDE, il est possible d'identifier des facteurs de fabrication et de formuler des règles de conception fondées sur ces facteurs pour réduire la durée de fabrication des composantes de structures d'acier.

**2<sup>ème</sup> prémisses** : Une analyse des contenus des RFIs peut permettre d'identifier des facteurs à fort impact sur la durée de fabrication des composantes des structures d'acier.

**3<sup>ème</sup> prémisses** : Les modèles BIM peuvent servir à l'identification des facteurs à fort impact sur la durée de fabrication de composantes structures d'acier.

**4<sup>ème</sup> prémisses** : Les entrevues avec des concepteurs et fabricants de structures d'acier peuvent permettre d'identifier des facteurs à fort impact sur le temps de fabrication et de formuler des règles de conception pour réduire la durée de fabrication des structures d'acier.

## 6.2 Résultats et discussion

**1<sup>er</sup> prémisses :** À l'instar de l'industrie du PDE, il est possible d'identifier des facteurs de fabrication, et de formuler des règles de conception pour réduire la durée de fabrication des composantes de structures d'acier.

- dans le PDE, Boothroyd (1992) identifiait la « quantité de pièces » comme le facteur à plus fort impact sur le temps d'assemblage des composantes mécaniques après avoir simulé et évalué des options d'assemblage. L'identification de ce facteur d'assemblage a ouvert la voie à la formulation des règles de conception pour assemblage. Dans cette thèse, 20 facteurs de fabrication et d'assemblage sont identifiés à travers trois différentes méthodes dans les chapitres 3, 4 et 5. Ces facteurs ont initié la formulation de 33 règles de conception pour réduire le temps de fabrication des composantes de structures d'acier et la formulation de 17 initiatives pour mieux considérer les facteurs de fabrication pendant la conception ;
- les facteurs identifiés dans les chapitres 3 et 4 ont été utilisés comme support pour le codage mixte dans l'identification des règles de conception du chapitre 5. Ceci peut traduire le fait que les méthodes utilisées dans cette thèse doivent être complémentaires et consécutives pour une meilleure identification des facteurs de fabrication et une meilleure formulation des règles de conception ;
- certains facteurs identifiés par les méthodes qualitatives au codage ouvert au chapitre 3 et la méthode quantitative au chapitre 4 peuvent nécessiter l'interprétation des fabricants des composantes de structures d'acier pour une compréhension complète. En effet, les facteurs masse, longueur et hauteur de la structure à usiner ou à assembler ont besoin des dimensions maximales à respecter dans la formulation des règles de conception;
- il peut s'avérer insuffisant d'utiliser les facteurs de fabrication identifiés uniquement par la méthode quantitative et des règles de conception provenant de l'industrie du PDE. En effet, dans la littérature, on retrouve quelques facteurs de fabrication de structures d'acier identifiés par des méthodes quantitatives, et quelques règles de conception formulées à partir de celles proposées dans l'industrie du PDE. Cependant,

seulement 5 des 20 facteurs identifiés dans cette étude correspondent aux facteurs identifiés dans la littérature, 9 des 33 règles de conception identifiées dans cette étude correspondent à des règles de conception identifiées dans la littérature, et aucune des 17 initiatives proposées pour considérer les facteurs de fabrication pendant la conception n'est citée dans la littérature. Ceci peut justifier la nécessité d'identifier des facteurs et des règles de conception propres à des projets de construction de structures en acier.

**2<sup>ème</sup> prémisse** : Une analyse des contenus des RFIs peut permettre d'identifier des facteurs à fort impact sur la durée de fabrication des composantes des structures d'acier.

- l'analyse qualitative par codage ouvert des contenus de RFIs peut permettre d'identifier des facteurs non pris en considération durant la conception des structures d'acier. Puisque les RFIs étudiés sont ceux formulés par les fabricants à l'endroit des concepteurs, les facteurs identifiés dans l'étude du chapitre 3 correspondent aux facteurs de fabrication des composantes de structures d'acier, non considérés par les concepteurs;
- l'analyse qualitative par codage ouvert des RFIs peut permettre d'établir des liens entre les thèmes identifiés, et permettre une meilleure interprétation des résultats. En effet, dans le chapitre 3 de cette thèse, la connexion est identifiée comme le facteur avec le plus fort impact sur le temps de fabrication. Le thème connexion est lié au thème poutre et au thème colonne. Ainsi, la connexion des poutres avec les colonnes de structures d'acier est interprétée ici comme le facteur de fabrication à plus fort impact sur la fabrication et l'assemblage des composantes de structures d'acier;
- l'analyse qualitative par codage ouvert des contenus de RFIs peut permettre d'identifier l'impact que peuvent avoir les facteurs de fabrication identifiés sur un projet de construction en acier. En effet, les facteurs identifiés ont chacun un nombre de RFIs concernés et un temps d'attente identifié. Ces deux considérations peuvent renseigner sur l'impact que le facteur identifié peut avoir sur le temps de fabrication;

- les facteurs de fabrication identifiés par l'analyse par codage ouvert des contenus de RFIs ne varient pas en fonction de la taille des projets de construction de structures en acier. Les grands, les moyens et les petits projets de construction de structures en acier sont réalisés par différentes équipes appartenant au même bureau de conception. Pourtant, les facteurs de fabrication identifiés sont identiques. Aussi, le fait que les facteurs de fabrication soient identiques, quelle qu'en soit la taille des projets peuvent permettre de valider la méthode utilisée pour identifier les facteurs de fabrication;
- les concepteurs de structures d'acier suspectaient la connexion des composantes de structures comme le facteur à plus fort impact sur le temps de fabrication de structures d'acier. L'étude menée dans le chapitre 3 a permis de valider l'intuition des concepteurs en leur proposant des données pour démontrer ce fait. Ainsi, les facteurs de fabrication identifiés par l'analyse par codage ouvert des contenus des RFIs peuvent permettre aux professionnels de valider certains facteurs de fabrication dont ils suspectent l'existence et l'impact que ce facteur peut avoir sur le temps de fabrication des ouvrages d'acier;

**3<sup>ème</sup> prémisse :** Les modèles BIM peuvent servir à l'identification des facteurs à fort impact sur la durée de fabrication de composantes de structures d'acier.

- l'analyse quantitative de 55 444 modèles BIM par des algorithmes de l'AM ont permis d'identifier que les facteurs « poids des composantes d'acier », « nombre de cambrure », « longueurs de composante » et « profondeur de composantes » sont les facteurs avec le plus grand impact sur le temps de fabrication des structures d'acier. Ainsi, l'analyse des modèles BIM peut permettre d'identifier les facteurs à fort impact sur la durée de fabrication de composantes de structures d'acier;
- l'analyse quantitative des modèles BIM par des algorithmes de l'AM peuvent renseigner sur les connaissances relatives aux limites des équipements disponibles dans les usines de fabrication et d'assemblage. En effet, les facteurs « poids des composantes d'acier », « nombre de cambrure », « longueurs de composante » et « profondeur de composantes » sont liés aux capacités des équipements disponibles dans les usines de fabrication et d'assemblage;

- le facteur « poids des composantes d'acier » est supérieur au facteur « nombre de cambrure » qui est à son tour supérieur au facteur « profondeur de composantes ». Ainsi, l'analyse quantitative des modèles BIM par des algorithmes de l'AM peut permettre une classification du poids de facteurs de fabrication sur le temps d'assemblage des structures d'acier. Cette initiative peut permettre formulation des règles de conception et le choix judicieux des règles à appliquer en cas de conflit entre les règles;
- l'analyse quantitative des modèles BIM par des algorithmes de l'AM peut permettre aux fabricants de composantes de structures d'acier d'identifier les lacunes des équipements disponibles dans les unités de production. La prise en compte de ces lacunes peut permettre aux fabricants d'initier des modifications de façon à considérer les limites de leurs équipements;

**4<sup>ème</sup> prémisse** : Les entrevues avec des concepteurs et fabricants de structures d'acier peuvent permettre d'identifier des facteurs à fort impact sur le temps de fabrication, et la formulation des règles de conception pour réduire la durée de fabrication des structures d'acier.

- les entrevues avec des concepteurs et fabricants de structures d'acier ont permis l'identification de 20 facteurs de fabrication et la formulation de 33 règles de conception spécifiques à l'industrie de la fabrication de structures d'acier. Les facteurs de fabrication identifiés ont également permis l'identification de 17 initiatives pour mieux considérer les facteurs de fabrication pendant la conception;
- les entrevues avec les concepteurs peuvent permettre l'identification des connaissances que les concepteurs attendent de la part des fabricants. En effet, les entrevues avec les concepteurs et les fabricants ont permis d'identifier le besoin des concepteurs en termes de connaissance relative au matériel et équipements disponibles dans l'usine de fabrication;
- les entrevues avec les concepteurs peuvent permettre aux concepteurs d'identifier leurs lacunes. En effet, les entrevues ont permis d'identifier les points à développer en termes

de formation sur les processus de fabrication qui pourraient être bénéfiques pour les concepteurs;

- un des points identifiés par les concepteurs est la non-prise en compte des facteurs de fabrication par les outils BIM. Ce point peut justifier la nécessité d'intégrer dans les logiciels BIM de conception des structures d'acier, des facteurs relatifs à la fabrication des composantes de structures d'acier. De plus, retenir 33 règles de conception peut s'avérer une tâche difficile pour les concepteurs. Intégrer ces règles de conception directement sur les logiciels BIM permettra une meilleure considération de ces règles.

### **6.3 Limites et perspectives du projet.**

Réaliser ce travail de thèse ne s'est pas fait sans difficulté. Cette partie fait état des difficultés rencontrées durant ce travail de thèse et propose des perspectives de travail pour les contourner.

- le nonaccès aux informations d'autres firmes de fabrication de structures d'acier

Les initiatives proposées dans cette étude ont été appliquées dans les installations appartenant à un seul fabricant de structures d'acier. De cette façon, il est difficile de savoir si les facteurs identifiés correspondent uniquement à ce fabricant de structures ou à des projets de construction de structures en acier en général. Pour en avoir la certitude, il serait intéressant de procéder à l'identification des facteurs de fabrication et la formulation des règles de conception suivant les méthodes proposées dans cette thèse chez d'autres fabricants.

- l'implémentation des règles de conception pour apprécier leur impact sur la durée des projets

Les initiatives apportées dans ce projet de thèse doivent être implémentées progressivement dans des projets de construction de structures en acier similaires pour apprécier leur impact. Appliquer cette approche est hors de la portée du travail défini pour cette thèse.

- l'application de toutes initiatives de cette thèse dans d'autres professions de l'industrie de l'AIC

Cette thèse s'applique principalement sur le domaine de la fabrication des composantes en structures d'acier. Cependant, les initiatives proposées peuvent être appliquées dans d'autres

domaines de l'industrie de l'AIC comme la fabrication des murs rideaux ou des composantes en bois. Appliquer ces études dans des domaines différents de l'industrie de l'AIC permettra d'apprécier les limites de cette étude.

- le nombre de participants aux entrevues individuelles et de groupe

La grande différence de la nature des projets dans les projets de construction de structures en acier rend difficile la disponibilité des professionnels ayant travaillé sur les projets identiques, et par conséquent l'identification des facteurs de fabrication par des entrevues. Cette difficulté peut être minimale dans d'autres professions de l'industrie de l'AIC comme la fabrication des murs rideaux, où les facteurs sont très similaires en fonction des projets.

- identification des facteurs de fabrication relatifs à d'autres critères de performance

Les activités dans un projet de construction de structures en acier ne s'arrêtent pas à la phase de fabrication. Il y a lieu de considérer d'autres activités dont la considération pendant la phase de conception peut apporter de la valeur dans le projet. C'est le cas du Design for Excellence DFX dans l'industrie du PDE, avec X pour fabrication, assemblage, environnement, transport, etc. (Kuo, Huang et Zhang, 2001 ; Holt et Barnes, 2010). Dans l'industrie de la construction, Koskela (2000) propose une théorie de production propre à l'industrie de la construction, c'est la théorie du TFV. Cette théorie définit les opérations de construction comme des transformations des matières premières, sur un flux tiré pour développer de la valeur (satisfaction du client). Nous pensons que ce concept peut être adapté pour identifier des facteurs de fabrication et formuler des règles de conception qui vont permettre aux concepteurs de considérer la transformation le flux et la valeur pendant la conception. Nous avons appelé ce concept le *DFTFV* (Fokwa Soh, Forgues et Doré, 2017). Développer le *DFTFV* suivant les méthodes développées dans cette thèse se propose comme une bonne perspective à ce travail de thèse.



## CONCLUSION

Ce travail de thèse avait pour objectif de formuler des règles de conception pour réduire la durée de fabrication dans des composantes de structures en acier. Cette initiative s'inscrit dans un contexte de l'industrie de l'ACI, majoritairement influencée par les effets du mode traditionnel de réalisation DBB. L'une des conséquences du DBB dans les projets de construction à structures d'acier est la fragmentation entre les phases de conception et la phase fabrication. La fragmentation empêche l'intégration des connaissances et de l'expérience des fabricants pendant la conception, ce qui contribue à une conception sous optimale, qui ne tient pas en considération les contraintes de fabrication et qui aboutit à une augmentation des coûts et des délais des projets. Cette thèse souhaite apporter une contribution pour améliorer cette situation à travers l'identification des facteurs de fabrication et la formulation des règles de conception pour réduire la durée de fabrication des composantes en acier.

Pour arriver à cet objectif, cette thèse propose trois méthodes pour identifier des facteurs de fabrication et formuler des règles de conception. Les méthodes proposées permettent d'identifier des facteurs de fabrication à partir des RFIs, des modèles BIM et de verbatim des entrevues avec les concepteurs et fabricants de structures d'acier. La participation d'un partenaire industriel leader du domaine de la fabrication des composantes d'acier en Amérique du Nord a permis à cette thèse d'arriver à des résultats.

La mise en place des méthodes proposées dans cette thèse requière des connaissances relatives à l'analyse des données quantitatives et qualitatives. Ainsi, des connaissances relatives à l'utilisation des algorithmes de l'apprentissage machine avec les logiciels R et Python, et le traitement qualitatif des données ont été appliquées durant le traitement des données pour l'aboutissement de cette thèse.

Comme contribution originale, cette thèse démontre qu'il est possible de proposer des facteurs de fabrication et des règles de conception pour réduire la durée de fabrication des structures d'acier à travers l'utilisation des RFIs, des modèles BIM et des entrevues. Comme autre contribution, cette thèse permet d'identifier 15 facteurs de fabrication, 24 règles de conception et 17 initiatives non préalablement identifiées dans la littérature. Cette thèse démontre également que les facteurs de fabrication ne dépendent pas de la taille des projets.

Comme perspective, ce travail de thèse propose l'application des méthodes développées dans cette étude dans d'autres contextes industriels, afin de vérifier si les facteurs et les règles de conception identifiés sont généraux ou spécifiques aux contextes industriels étudiés. Cette thèse propose aussi d'identifier des facteurs et de proposer des règles de conception relative à d'autres critères de performance comme la transformation, la traction du flux et le développement de la valeur, conformément aux principes de la production en construction proposés par Koskela (2000).

## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (CII), Construction Industry Institute. 1993. *Constructability implementation guide. CII Publ. 34-1.*
- Abadi, Mohamed. 2005. *Issues and challenges in communication within design teams in the construction industry:: Investigation into the use of virtual teams and information and communication technologies (ICTs) in the UK construction industry.*
- Abolnour, Mohammad Mahmoud. 1994. *The relationship of fee structure in engineering offices and design deficiency.*
- Alfieri, Evandro, E Seghezzi, M Sauchelli, G M Di Giuda et G Masera. 2020. « A BIM-based approach for DfMA in building construction: framework and first results on an Italian case study ». *Architectural Engineering and Design Management*, p. 1-23.
- Alshamrani, Othman Subhi. 2017. « Construction cost prediction model for conventional and sustainable college buildings in North America ». *Journal of Taibah University for Science*, vol. 11, n° 2, p. 315-323. <<https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2016.01.004>>.
- Anand Rajagopal. 2017. « The Rise of AI and Machine Learning in Construction ». <<https://doi.org/Medium Corporation>>. Consulté le 8 novembre 2018.
- Andrews, W. 2005. « RFI recommendations ». *Modern Steel Construction*, vol. 46, n° 10, p. 37-41.
- Anitha, K, M Santhiya et BIHER BIST. 2018. « COMPARATIVE STUDY OF DIFFERENT FRAMING SYSTEM FOR MULTI STOREY COMPOSITE BUILDING WITH IRREGULAR GEOMETRY ». *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 119, n° 12, p. 9721-9740.
- Ansari-Ch, Fazel, Susanne Dienst, Patrick Uhr et Madjid Fathi. 2011. « Using data analysis for discovering improvement potentials in production process ». In *2011 IEEE International Conference on Industrial Technology*. (2011), p. 281-286. IEEE.
- Anumba, Chimay, John M Kamara et Anne-Francoise Cutting-Decelle. 2006. *Concurrent engineering in construction projects*. Routledge.
- Araszkiwicz, Krystyna. 2020. « Value Engineering applicability in design of sustainable, energy efficient buildings ». In *E3S Web of Conferences*. (2020). EDP Sciences.
- Arditi, David, Ahmed Elhassan et Y Cengiz Toklu. 2002. « Constructability analysis in the design firm ». *Journal of construction engineering and management*, vol. 128, n° 2, p. 117-126.
- Ashley, Steven. 1995. « Cutting costs and time with DFMA ». *Mechanical Engineering*, vol. 117, n° 3, p. 74.
- Assaf, Sadi, Mohammad A Hassanain et Abdullatif Abdallah. 2018. « Review and assessment of the causes of deficiencies in design documents for large construction projects ». *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, vol. 36, n° 3, p. 300-317.
- Bangash, Mohammad Yusaf Hassan. 2000. *Structural detailing in steel: a comparative study of British, European and American codes and practices*. Thomas Telford.
- Banks, Colin, Raj Kotecha, Jason Curtis, Christopher Dee, Neil Pitt et Richard Papworth. 2018. « Enhancing high-rise residential construction through design for manufacture and assembly—a

UK case study ». *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Management, Procurement and Law*, vol. 171, n° 4, p. 164-175.

Barg, Steve, Forest Flager et Martin Fischer. 2017. « An analytical method to estimate the total installed cost of structural steel building frames during early design ». <<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.10.010>>. Consulté le 20 mars 2018.

Barrett, Jermaine. 2016. *The Impact from Building Information Modelling at the Design Stage within the Construction Process*.

BCSA. 2003. *Steel Buildings*.

Bogue, Robert. 2012. « Design for manufacture and assembly: background, capabilities and applications ». *Assembly automation*.

Boothroyd, Geoffrey. 1994. « Product design for manufacture and assembly ». *Computer-Aided Design*, vol. 26, n° 7, p. 505-520. <[https://doi.org/10.1016/0010-4485\(94\)90082-5](https://doi.org/10.1016/0010-4485(94)90082-5)>.

Boothroyd, Geoffrey et Leo Alting. 1992. « Design for assembly and disassembly ». *CIRP annals*, vol. 41, n° 2, p. 625-636.

Boton, Conrad et Daniel Forgues. 2017. « The Need for a New Systemic Approach to Study Collaboration in the Construction Industry ». In *Procedia Engineering*. (2017), p. 1043-1050. Elsevier Ltd. <<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.060>>. Consulté le 30 janvier 2018.

Brennan, Louis, Surendra M. Gupta et Karim N. Taleb. 1994. « Operations Planning Issues in an Assembly/Disassembly Environment ». *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 14, n° 9, p. 57-67. <<https://doi.org/10.1108/01443579410066767>>.

Budd, Richard W, Robert K Thorp et Lewis Donohew. 1967. « Content analysis of communications ».

Burati Jr, James L, Jodi J Farrington et William B Ledbetter. 1992. « Causes of quality deviations in design and construction ». *Journal of construction engineering and management*, vol. 118, n° 1, p. 34-49.

Cameron, A GoWo. 1973. « Abundances of the elements in the solar system ». *Space Science Reviews*, vol. 15, n° 1, p. 121-146.

Carter, C J et T D Schlafly. 2008. « ave More Money ». *Modern Steel Construction*, p. 55-59.

Chapelle, Olivier, Bernhard Scholkopf et Alexander Zien. 2009. « Semi-supervised learning (chapelle, o. et al., eds.; 2006)[book reviews] ». *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 20, n° 3, p. 542.

Chapman, Pete, Julian Clinton, Randy Kerber, Thomas Khabaza, Thomas Reinartz, Colin Shearer et Rudiger Wirth. 2000. « CRISP-DM 1.0: Step-by-step data mining guide ». *SPSS inc*, vol. 9, p. 13.

Charbrolin, B. 1992. « LES POINTS FORTS ET LES AVANTAGES DES GRANDS OUVRAGES METALLIQUES ». *ASSISES DU GENIE CIVIL-PARIS 8, 9 ET 10 DECEMBRE 1992-FASCICULE 3: MATERIAUX ET STRUCTURES*. <<https://trid.trb.org/view/1004013>>.

Chen, Ke et Weisheng Lu. 2018. « Design for manufacture and assembly oriented design approach to a curtain wall system: a case study of a commercial building in Wuhan, China ». *Sustainability*,

vol. 10, n° 7, p. 2211.

- Cheng, Min Yuan, Hsien Sheng Peng, Yu Wei Wu et Te Lin Chen. 2010. « Estimate at completion for construction projects using evolutionary support vector machine inference model ». *Automation in Construction*, vol. 19, n° 5, p. 619-629. <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.02.008>>.
- Cooper, Robin et Regine Slagmulder. 2017. *Target costing and value engineering*. Routledge.
- Crotty, R A Y. 2012. « THE IMPACT OF BUILDING INFORMATION Transforming construction The Impact of Building ».
- Dell'Isola, Alphonse. 1997. *Value engineering: Practical applications... for design, construction, maintenance and operations*. RSMears.
- Deutsch, Randy. 2011. *BIM and integrated design: strategies for architectural practice*. John Wiley & Sons.
- Diekmann, James E et Mark C Nelson. 1985. « Construction claims: Frequency and severity ». *Journal of construction Engineering and Management*, vol. 111, n° 1, p. 74-81.
- Downe-Wamboldt, Barbara. 1992. « Content analysis: method, applications, and issues ». *Health care for women international*, vol. 13, n° 3, p. 313-321.
- Dupagne, A. 1991. « Computer integrated building. Strategic final report ». *ESPRIT II: Exploratory Action*, n° 5604, p. p24-28.
- Eastman, Charles M, Chuck Eastman, Paul Teicholz et Rafael Sacks. 2011. *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. John Wiley & Sons.
- Edzarenski. 2018. « Steel Statistics and Steel Cost Increase Affect on Construction ». In *Construction Analytics*. <<https://edzarenski.com/2016/09/18/steel-statistics-and-steel-cost-increase-affect-on-construction-02-19/>>.
- Egan, J. 1998. « The Egan report-rethinking construction ». *report of the construction industry task force to the deputy prime minister*. London.
- Elliott, Victoria. 2018. « Thinking about the coding process in qualitative data analysis ». *The Qualitative Report*, vol. 23, n° 11, p. 2850-2861.
- Elvin, George. 2007. *Integrated practice in architecture: mastering design-build, fast-track, and building information modeling*. John Wiley & Sons.
- Emmatty, Francis J et S P Sarmah. 2012. « Modular product development through platform-based design and DFMA ». *Journal of Engineering Design*, vol. 23, n° 9, p. 696-714.
- Esmaeilian, Behzad, Sara Behdad et Ben Wang. 2016. « The evolution and future of manufacturing: A review ». *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 39, p. 79-100.
- Evers, H G A et I R F Maatje. 2000. « Cost based engineering and production of steel constructions ». In *Steel Design Codes—Fourth International Workshop on Connections in Steel Structures*. (2000), p. 14-22.

- Filippi, Stefano et Ilaria Cristofolini. 2009. *The design guidelines collaborative framework: a design for Multi-X method for product development*. Springer Science & Business Media.
- Fokwa Soh, Mathieu, Daniel Barbeau, Sylvie Dore et Daniel Forgues. 2018. « Design rules to improve efficiency in the steel construction industry ».
- Fokwa Soh, Mathieu, Daniel Barbeau, Sylvie Dore et Daniel Forgues. 2019. « Toward a Qualitative RFIs Content Analysis Approach to Improve Collaboration Between Design and Construction Phases ».
- Fokwa Soh, Mathieu, Daniel Forgues et Sylvie Doré. 2017. « Integrating concepts and principles from lean thinking and the design for X to BIM ».
- Fonti, Valeria et Eduard Belitser. 2017. « Feature selection using lasso ». *VU Amsterdam Research Paper in Business Analytics*, vol. 30, p. 1-25.
- Forbes, Lincoln H et Syed M Ahmed. 2010. *Modern construction: lean project delivery and integrated practices*. CRC Press.
- Forgues, Daniel et Ivanka Iordanova. 2010. « An IDP-BIM framework for reshaping professional design practices ». In *Construction Research Congress 2010: Innovation for Reshaping Construction Practice*. (2010), p. 172-182.
- Forgues, Daniel, Ivanka Iordanova, Fernando Valdivesio et Sheryl Staub-French. 2012. « Rethinking the cost estimating process through 5D BIM: A case study ». In *Construction Research Congress 2012*. (17 mai 2012), p. 778-786. American Society of Civil Engineers. <<https://doi.org/10.1061/9780784412329.079>>. Consulté le 30 janvier 2018.
- Gao, Shang, Sui Pheng Low et Kisnaa Nair. 2018. « Design for manufacturing and assembly (DfMA): a preliminary study of factors influencing its adoption in Singapore ». *Architectural Engineering and Design Management*, vol. 14, n° 6, p. 440-456.
- Gill, Paul, Kate Stewart, Elizabeth Treasure et Barbara Chadwick. 2008. « Methods of data collection in qualitative research: interviews and focus groups ». *British dental journal*, vol. 204, n° 6, p. 291-295.
- Goh, Yang Miang et Sijie Chua. 2016. « Knowledge, attitude and practices for design for safety: A study on civil & structural engineers ». *Accident Analysis and Prevention*, vol. 93, p. 260-266. <<https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.09.023>>.
- Goldratt, Eliyahu M. 1990. *Theory of constraints*. North River Croton-on-Hudson.
- Graneheim, Ulla H, Britt-Marie Lindgren et Berit Lundman. 2017. « Methodological challenges in qualitative content analysis: A discussion paper ». *Nurse education today*, vol. 56, p. 29-34.
- Groupe-Canam. 2021. « Canam des solutions pour mieux construire ». <<https://www.groupecanam.com/>>. Consulté le 15 janvier 2021.
- Guide, A I A. 2007. « Integrated project delivery: A guide ». *American Institute of Architects, California*.
- Haapio, Jaakko. 2012. « Feature-based costing method for skeletal steel structures based on the process approach ». *Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu-Tampere University of Technology. Publication; 1027*.

- Halevi, Gideon et Roland Weill. 2012. *Principles of process planning: a logical approach*. Springer Science & Business Media.
- Han, Jiawei, Jian Pei et Micheline Kamber. 2011. *Data mining: concepts and techniques*. Elsevier.
- Harik, Ramy F et Najwa Sahmrani. 2010. « DFMA+, a quantitative DFMA methodology ». *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 7, n° 5, p. 701-709.
- Hayward, Alan, Frank Weare et A C Oakhill. 2008. *Steel detailers' manual*. John Wiley & Sons.
- Heinisuo, M, M Laasonen et J Haapio. 2010. « BIM based manufacturing cost estimation of building products ». *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction, ECPPM*, p. 53-59.
- Hill, Arthur V. 2012. *The encyclopedia of operations management: a field manual and glossary of operations management terms and concepts*. FT Press.
- Holt, Raymond et Catherine Barnes. 2010. « Towards an integrated approach to “design for X”: An agenda for decision-based DFX research ». *Research in Engineering Design*, vol. 21, n° 2, p. 123-136. <<https://doi.org/10.1007/s00163-009-0081-6>>.
- Hosny, H E, A H Ibrahim et A E Elmalt. 2019. « Factors Affecting Quality of Tender Documents ». *Al-Azhar University Civil Engineering Research Magazine (CERM)*, vol. 41, n° 1, p. 346-355.
- Hsieh, Hsiu-Fang et Sarah E Shannon. 2005. « Three approaches to qualitative content analysis ». *Qualitative health research*, vol. 15, n° 9, p. 1277-1288.
- Hu, Xiaolin, Ming Lu et Simaan AbouRizk. 2014. « BIM-based data mining approach to estimating job man-hour requirements in structural steel fabrication ». In *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*. (2014), p. 3399-3410. IEEE Press.
- Huang, Gao, Shiji Song, Jatinder N D Gupta et Cheng Wu. 2014. « Semi-supervised and unsupervised extreme learning machines ». *IEEE transactions on cybernetics*, vol. 44, n° 12, p. 2405-2417.
- Hughes, Nigel, M Wells, C Nutter et J Zack. 2013. « Impact & control of RFIs on construction projects ». *Navigant Construction ForumTM*.
- Jeong, WoonSeong, Soowon Chang, JeongWook Son et June-Seong Yi. 2016. « BIM-integrated construction operation simulation for just-in-time production management ». *Sustainability*, vol. 8, n° 11, p. 1106.
- Jin, Runzhi, Kyuman Cho, Changtaek Hyun et Myungjin Son. 2012. « MRA-based revised CBR model for cost prediction in the early stage of construction projects ». *Expert Systems with Applications*, vol. 39, n° 5, p. 5214-5222. <<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.11.018>>.
- Jin, RunZhi, KyuMan Cho, ChangTaek Hyun et MyungJin Son. 2012. « MRA-based revised CBR model for cost prediction in the early stage of construction projects ». *Expert Systems with Applications*, vol. 39, n° 5, p. 5214-5222.
- Jin, Ruoyu, Tong Yang, Poorang Piroozfar, Byung-Gyoo Kang, Dariusz Wanatowski, Craig Matthew Hancock et Llewellyn Tang. 2018. « Project-based pedagogy in interdisciplinary building design adopting BIM ». *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 25, n°

10, p. 1376-1397.

- Jonasson, Jonas, Lars-Åke Mikaelsson et Urban Persson. 2020. « Knowledge management of sustainable construction processes ». In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. (2020), p. 22030. IOP Publishing.
- Kaefer, Florian, Juliet Roper et Paresha N Sinha. 2015. « A software-assisted qualitative content analysis of news articles: Examples and reflections ».
- Kelleher, John D, Brian Mac Namee et Aoife D'arcy. 2015. *Fundamentals of machine learning for predictive data analytics: algorithms, worked examples, and case studies*. MIT press.
- KELLEY, T O M AUTOR. 2001. *The art of innovation: Lessons in creativity from IDEO, America's leading design firm*. Broadway Business.
- Kent, David C et Burcin Becerik-Gerber. 2010. « Understanding construction industry experience and attitudes toward integrated project delivery ». *Journal of construction engineering and management*, vol. 136, n° 8, p. 815-825.
- Kim, Min-Koo, Scott McGovern, Michael Belsky, Campbell Middleton et Ioannis Brilakis. 2016. « A suitability analysis of precast components for standardized bridge construction in the United Kingdom ». *Procedia engineering*, vol. 164, p. 188-195.
- Kitzinger, Jenny. 1994. « The methodology of focus groups: the importance of interaction between research participants ». *Sociology of health & illness*, vol. 16, n° 1, p. 103-121.
- Koo, Choongwan, Taehoon Hong et Changtaek Hyun. 2011. « The development of a construction cost prediction model with improved prediction capacity using the advanced CBR approach ». *Expert Systems with Applications*, vol. 38, n° 7, p. 8597-8606. <<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.01.063>>.
- Koskela, Lauri. 1992. « Application of the new production philosophy to construction ». *Center for Integrated Facility Engineering*, p. 1-81. <<https://doi.org/Technical Report No. 72>>.
- Koskela, Lauri. 2000. « An exploration towards a production theory and its application to construction ». p. 297.
- Kovacic, Iva et Veronika Zoller. 2015. « Building life cycle optimization tools for early design phases ». *Energy*, vol. 92, p. 409-419.
- Kuo, Tsai C., Samuel H. Huang et Hong C. Zhang. 2001. « Design for manufacture and design for "X": Concepts, applications, and perspectives ». *Computers and Industrial Engineering*, vol. 41, n° 3, p. 241-260. <[https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(01\)00045-6](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(01)00045-6)>.
- Lantz, Brett. 2015a. « Machine Learning with R ». *PACKT publishing Ltd*, vol. 2. <<http://books.tarsoit.com/Machine Learning with R - Second Edition.pdf>>. Consulté le 4 décembre 2017.
- Lantz, Brett. 2015b. *Machine learning with R*. Packt Publishing Ltd.
- Latham Sir, M. 1994. *Constructing the team: Final report of the government/industry review of procurement and contractual arrangements in the UK construction industry*.
- Lawson, Bryan. 2006. *How designers think: the design process demystified*. Routledge.
- Lawson, Mark, Ray Ogden et Chris Ian Goodier. 2014. *Design in modular construction*. CRC Press

Boca Raton, FL.

- Liaw, Andy et Matthew Wiener. 2002. « Classification and regression by randomForest ». *R news*, vol. 2, n° 3, p. 18-22.
- Lindkvist, Kent. 1981. « Approaches to textual analysis ». *Advances in content analysis*, vol. 9, p. 23-42.
- Lingitz, Lukas, Viola Gallina, Fazel Ansari, Dávid Gyulai, András Pfeiffer et László Monostori. 2018. « Lead time prediction using machine learning algorithms: A case study by a semiconductor manufacturer ». *PROCEDIA CIRP*, vol. 72, p. 1051-1056.
- Love, Peter, Peter Davis, Joanne Ellis et Sai On Cheung. 2010. « Dispute causation: identification of pathogenic influences in construction ». *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 17, n° 4, p. 404-423.
- Lu, Weisheng, Tan Tan, Jinying Xu, Jing Wang, Ke Chen, Shang Gao et Fan Xue. 2020. « Design for manufacture and assembly (DfMA) in construction: the old and the new ». *Architectural Engineering and Design Management*, p. 1-15.
- Lutz, James D, Donn E Hancher et E William East. 1990. « Framework for design-quality-review data-base system ». *Journal of Management in Engineering*, vol. 6, n° 3, p. 296-312.
- Magretta, Joan. 2002. *Why business models matter*.
- McCuish, James D et J Jerry Kaufman. 2002. « Value Management & Value Improving Practices ». *Proc., Soc. American Value Engineers (SAVE)*, p. 1-16.
- McFarlane, Angus et J Stehle. 2014. « DfMA: engineering the future ». In *Proceedings of Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH) 2014 Shanghai Conference*. (2014), p. 508-516.
- McTavish, Donald G et Ellen B Pirro. 1990. « Contextual content analysis ». *Quality and quantity*, vol. 24, n° 3, p. 245-265.
- Mei, Qiaozhu et ChengXiang Zhai. 2005. « Discovering evolutionary theme patterns from text: an exploration of temporal text mining ». In *Proceedings of the eleventh ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery in data mining*. (2005), p. 198-207. ACM.
- Meidan, Yair, Boaz Lerner, Gad Rabinowitz et Michael Hassoun. 2011. « Cycle-time key factor identification and prediction in semiconductor manufacturing using machine learning and data mining ». *IEEE transactions on semiconductor manufacturing*, vol. 24, n° 2, p. 237-248.
- Michalski, Ryszard S, Jaime G Carbonell et Tom M Mitchell. 2013. *Machine learning: An artificial intelligence approach*. Springer Science & Business Media.
- Miles, Lawrence D. 1961. « Value engineering ».
- Minichiello, Victor, Rosalie Aroni et Victor Minichiello. 1990. *In-depth interviewing: Researching people*. Longman Cheshire.
- Mohamed, S, P A Tilley et S N Tucker. 1999. « Quantifying the time and cost associated with the request for information (RFI) process in construction ». *International Journal of Construction Information Technology*, vol. 7, n° 1, p. 35-50.

- Mohd Nawawi, Mohd Nasrun, Nazim Baluch et Ahmad Yusni Bahauddin. 2014. « Impact of Fragmentation Issue in Construction Industry: An Overview ». *MATEC Web of Conferences*, vol. 15, p. 01009. <<https://doi.org/10.1051/mateconf/20141501009>>.
- Mohsenijam, Arash et Ming Lu. 2016. « Achieving sustainable structural steel design by estimating fabrication labor cost based on BIM data ». *Procedia Engineering*, vol. 145, p. 654-661.
- Monteiro, André et João Poças Martins. 2013. « A survey on modeling guidelines for quantity takeoff-oriented BIM-based design ». *Automation in Construction*, vol. 35, p. 238-253.
- Morgan, David L, Richard A Krueger et Jean A King. 1998. *Moderating focus groups*. Sage Publications, Inc.
- Moynihan, Muiris C et Julian M Allwood. 2014. « Utilization of structural steel in buildings ». *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 470, n° 2168, p. 20140170.
- Nigro, William T. 1987. « CONTRACT DOCUMENTS, A QUALITY-CONTROL GUIDE+ REDICHECK-PLAN-AND-SPECIATION-REVIEW ». *ARCHITECTURE-THE AIA JOURNAL*, vol. 76, n° 1, p. 82-85.
- Onungwa, Ihuoma Onyinechi et Nnezi Uduma-Olugu. 2017. « Building information modelling and collaboration in the Nigerian construction industry ». *Journal of Construction Business and Management*, vol. 1, n° 2, p. 1-10.
- Othman, Ezzat et Ayman Ahmed. 2011. « Improving building performance through integrating constructability in the design process ». *Organization, technology & management in construction: an international journal*, vol. 3, n° 2, p. 333-347.
- Öztürk, Atakan, Sinan Kayalğıl et Nur E Özdemirel. 2006. « Manufacturing lead time estimation using data mining ». *European Journal of Operational Research*, vol. 173, n° 2, p. 683-700.
- Papajohn, D, D Alleman, M E Asmar et K Molenaar. 2018. *Exploring potential delays associated with requests for information in cm/gc highway construction*. <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85049190279&doi=10.1061%2F9780784481295.064&partnerID=40&md5=180433a2f24f2fb0c0cfe17c6e30a5>>.
- Paulus, Paul B et Bernard A Nijstad. 2003. *Group creativity: Innovation through collaboration*. Oxford University Press.
- Pavlovčič, Luka, Aleš Krajnc et Darko Beg. 2004. « Cost function analysis in the structural optimization of steel frames ». *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 28, n° 4, p. 286-295.
- Plebankiewicz, Edyta, Krzysztof Zima et Mirosław Skibniewski. 2015. « Analysis of the first polish BIM-based cost estimation application ». *Procedia Engineering*, vol. 123, p. 405-414.
- Rainer, Christian. 2013. « Data mining as technique to generate planning rules for manufacturing control in a complex production system ». In *Robust Manufacturing Control*, p. 203-214. Springer.
- Ramaswamy, Sanjay. 1998. « A survey of DFM methods ». *Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Arizona State University*.

- Raschka, Sebastian et Vahid Mirjalili. 2019. *Python Machine Learning: Machine Learning and Deep Learning with Python, scikit-learn, and TensorFlow 2*. Packt Publishing Ltd.
- Robinson, Clive. 2007. « Structural BIM: discussion, case studies and latest developments ». *The structural design of tall and special buildings*, vol. 16, n° 4, p. 519-533.
- Rodriguez-Toro, C A, Graham Jared et Kenneth Swift. 2004. « Product-development complexity metrics: a framework for proactive-DFA implementation ». In *DS 32: Proceedings of DESIGN 2004, the 8th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia*. (2004), p. 483-490.
- Roulston, Kathryn et Myungweon Choi. 2018. « Qualitative interviews ». *The SAGE handbook of qualitative data collection*, p. 233-249.
- Ruby, David I. 2008. *Constructability of structural steel buildings*. American Institute of Steel Construction.
- Sacks, Rafael, Chuck Eastman, Ghang Lee et Paul Teicholz. 2018. *BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers*. John Wiley & Sons.
- Sansom, M. 2003. « Briefing: Sustainable steel construction: building a better future ». In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability*. (2003), p. 81-82. Thomas Telford Ltd.
- Sarkar, Sobhan, Sammangi Vinay et Jhareswar Maiti. 2016. « Text mining based safety risk assessment and prediction of occupational accidents in a steel plant ». In *2016 International Conference on Computational Techniques in Information and Communication Technologies (ICCTICT)*. (2016). <<https://doi.org/10.1109/ICCTICT.2016.7514621>>.
- Schmidt, Juliana, Milton Borsato, Edmar Hinckel, Paulo Storrer, Eduardo Onofre et Fabio Maccari. 2018. « A framework for capturing and applying design knowledge in new product development ». *International Journal of Agile Systems and Management*, vol. 11, n° 1, p. 23-40.
- Schrage, Michael. 1999. *Serious play: How the world's best companies simulate to innovate*. Harvard Business Press.
- Sebastian, Rizal et Léon van Berlo. 2010. « Tool for Benchmarking BIM Performance of Design, Engineering and Construction Firms in The Netherlands ». *Architectural Engineering and Design Management*, vol. 6, n° 4, p. 254-263. <<https://doi.org/10.3763/aedm.2010.IDDS3>>.
- Selvaraj, P, P Radhakrishnan et M Adithan. 2009. « An integrated approach to design for manufacturing and assembly based on reduction of product development time and cost ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 42, n° 1-2, p. 13-29.
- Setiawan, Theresita Herni, Stephen Pramono Waluyo et Altho Sagara. 2019. « The Effects of Design Change on the Completion Time of Universitas Multimedia Nusantara Tower 3 Construction Project ».
- Sharqi, Rula et Ammar Kaka. 2014. « Health and Safety Visualization in Steel Construction Projects through Image Processing ». In *Computing in Civil and Building Engineering (2014)*. (2014). <<https://doi.org/10.1061/9780784413616.102>>.

- Shen, Zhigang. 2010. « BIM-ASSISTED CONSTRUCTION ».
- Shen, Zhigang et Raja R A Issa. 2010. « Quantitative evaluation of the BIM-assisted construction detailed cost estimates ».
- Shi, Huawang et Wanqing Li. 2008. « The integrated methodology of rough set theory and artificial neural-network for construction project cost prediction ». In *Intelligent Information Technology Application, 2008. IITA '08. Second International Symposium on.* (2008), p. 60-64. IEEE.
- da Silva, Carlos Eduardo Sanches, Eduardo Gomes Salgado, Carlos Henrique Pereira Mello, Eduardo da Silva Oliveira et Fabiano Leal. 2014. « Integration of computer simulation in design for manufacturing and assembly ». *International Journal of Production Research*, vol. 52, n° 10, p. 2851-2866.
- Da Silva, Carlos Eduardo Sanches, Eduardo Gomes Salgado, Carlos Henrique Pereira Mello, Eduardo Da Silva Oliveira et Fabiano Leal. 2014. « Integration of computer simulation in design for manufacturing and assembly ». *International Journal of Production Research*, vol. 52, n° 10, p. 2851-2866. <<https://doi.org/10.1080/00207543.2013.853887>>.
- Silva, Filipe et Fabien Mercier. 2020. « The changing characteristics of steel firms: Insights from the new OECD steel database ».
- da Silvaa, Carlos Eduardo Sanches. 2017. « ASSESSING INTEGRATION OF COMPUTER SIMULATION IN DESIGN FOR MANUFACTURING AND ASSEMBLY ». *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, vol. 14, n° 1, p. 48-59.
- Silverman, David. 2000. *Doing Qualitative Research: Sage Publications*.
- Sinclair, Dale. 2019. *Guide to Using the RIBA Plan of Work 2013*. Routledge.
- Soh, Mathieu Fokwa, Daniel Barbeau, Sylvie Doré et Daniel Forgues. 2020. « Qualitative analysis of Request For Information to identify design flaws in steel construction projects ». *Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal*, vol. 12, n° 1, p. 2083-2094.
- Son, Hyojoo et Changwan Kim. 2015. « Early prediction of the performance of green building projects using pre-project planning variables: data mining approaches ». *Journal of Cleaner Production*, vol. 109, p. 144-151. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.071>>.
- Song, Lingguang, Yasser Mohamed et Simaan M AbouRizk. 2009. « Early contractor involvement in design and its impact on construction schedule performance ». *Journal of Management in Engineering*, vol. 25, n° 1, p. 12-20.
- Sonmez, Rifat. 2011. « Range estimation of construction costs using neural networks with bootstrap prediction intervals ». *Expert Systems with Applications*, vol. 38, n° 8, p. 9913-9917. <<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.02.042>>.
- Sparksman, Peter John. 2015. « Quantifying the time and cost associated with the Request for Information (RFI) OR Technical Query (TQ) process-a designers perspective ».
- Staub-French, Sheryl, Erik A Poirier, Francisco Calderon, Imen Chikhi, Puyan Zadeh, Divyarajsinh Chudasma et Shitian Huang. 2018. « Building Information Modeling (BIM) and Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) for Mass Timber Construction ». *Bim Topics Research Lab, University of British Columbia, Vancouver*.

- Stoll, Henry W. 1986. « Design for manufacture: an overview ».
- Swift, Ken G et Nathan J Brown. 2003. « Implementation strategies for design for manufacture methodologies ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 217, n° 6, p. 827-833.
- Tamboli, Akbar R. 1999. *Handbook of structural steel connection design and details*. McGraw-Hill New York.
- Tesch, R. 1990. « Qualitative research—Analysis types and software protocols ». *Hampshire, UK: The Falmer Press*.
- Thanaki, Jalaj. 2017. *Python Natural Language Processing*. Packt Publishing Ltd.
- Tibshirani, Robert. 1996. « Regression shrinkage and selection via the lasso ». *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, vol. 58, n° 1, p. 267-288.
- Tilley, Paul A. 1998. *Causes, effects and indicators of design and documentation deficiency*. Queensland University of Technology, Brisbane.
- Toole, T Michael, Nicole Hervol et Matthew Hallowell. 2007. « Designing Steel for Construction Safety 1 ».
- Vaismoradi, Mojtaba et Sherrill Snelgrove. 2019. « Theme in qualitative content analysis and thematic analysis ». In *Forum Qualitative Sozialforschung/Forum: Qualitative Social Research*. (2019).
- Vijayarani, S et R Janani. 2016. « Text mining: open source tokenization tools—an analysis ». *Advanced Computational Intelligence*, vol. 3, n° 1, p. 37-47.
- Wah, L. 2014. « The Singapore BIM Roadmap ». In *Government BIM Symposium*. (2014).
- Watson, K B, S Dallas, N Van der Kreek et T Main. 1996. « Costing of steelwork from feasibility through to completion ». *Journal of Australian Steel Construction*, vol. 30, n° 2, p. 9.
- Wood, Kristin L, Daniel Jensen, Joseph Bezdek et Kevin N Otto. 2001. « Reverse engineering and redesign: Courses to incrementally and systematically teach design ». *Journal of Engineering Education*, vol. 90, n° 3, p. 363-374.
- Wu, Xianguo, Huitao Liu, Limao Zhang, Miroslaw J. Skibniewski, Qianli Deng et Jiaying Teng. 2015. « A dynamic Bayesian network based approach to safety decision support in tunnel construction ». *Reliability Engineering and System Safety*. <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.10.021>>.
- Yang, Y J et Albert Chan. 2018. « Steel construction in Hong Kong: supply chain and cost issues ».
- Zaker, Reza et Eloi Coloma. 2018. « Virtual reality-integrated workflow in BIM-enabled projects collaboration and design review: a case study ». *Visualization in Engineering*, vol. 6, n° 1, p. 4.
- Zhang, Cha et Yunqian Ma. 2012. *Ensemble machine learning: methods and applications*. Springer.
- Zhang, Sijie, Kristiina Sulankivi, Markku Kiviniemi, Ilkka Romo, Charles M. Eastman et Jochen Teizer. 2015. « BIM-based fall hazard identification and prevention in construction safety planning ». *Safety Science*. <<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.08.001>>.

Zhong, Yun et Peng Wu. 2015. « Economic sustainability, environmental sustainability and constructability indicators related to concrete-and steel-projects ». *Journal of Cleaner Production*, vol. 108, p. 748-756.

Zou, Yang, Arto Kiviniemi et Stephen W Jones. 2017. « A review of risk management through BIM and BIM-related technologies ». *Safety science*, vol. 97, p. 88-98.