

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE ET ANALYSE DU PROBLÈME .....	9
1.1    La charpente d'acier.....	9
1.1.1    Littérature.....	9
1.1.2    Charpente d'acier.....	10
1.1.3    Structure d'acier.....	12
1.2    Le transport routier .....	13
1.2.1    Littérature.....	13
1.2.2    Terminologie.....	14
1.2.3    Normes.....	21
1.2.4    Conclusion .....	27
1.3    La modélisation de données de bâtiments et ses formats d'échange .....	28
1.3.1    Littérature.....	28
1.3.2    Définition .....	29
1.3.3    Fonctionnement du BIM .....	30
1.3.4    Les formats d'échange .....	32
1.3.5    Conclusion .....	38
1.4    La fabrication additive .....	38
1.4.1    Littérature.....	39
1.4.2    Définition .....	39
1.4.3    Matériaux .....	40
1.4.4    Méthodes existantes .....	40
1.4.5    Modélisation .....	42
1.4.6    Conclusion .....	43
1.5    Les algorithmes de chargement .....	43
1.5.1    Typologie de Dyckhoff (1990) .....	44
1.5.2    Typologie de Wäscher et al (2007).....	44
1.5.3    État de l'art de Bortfeldt et Wäscher (2013).....	47
1.5.4    Article de Egeblad et al. (2010) .....	55
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE .....	57
2.1    Visites d'entreprises.....	57
2.1.1    Entreprise A .....	58
2.1.2    Entreprise B .....	59
2.1.3    Entreprise C .....	60
2.1.4    Entreprise D .....	61
2.1.5    Conclusion .....	62
2.2    Entrevues de candidats.....	62
CHAPITRE 3 PRÉPARATION DU MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL .....	65

3.1	Choix de la méthode de fabrication .....	65
3.1.1	Fournisseurs de services de fabrication additive testés.....	66
3.1.2	Pièces d'essai .....	67
3.1.3	Évaluation des fournisseurs .....	70
3.1.4	Exactitude .....	74
3.1.5	Sommaire et discussion.....	77
3.1.6	Conclusion .....	79
3.2	Modèles de membres .....	80
3.3	Impression avec la CUBE .....	83
3.4	Résultat de la fabrication .....	85
3.4.1	Liste des membres.....	86
3.4.2	Photos des membres.....	88
CHAPITRE 4 COLLECTE DE DONNÉES.....		89
4.1	Protocol expérimental .....	89
4.1.1	Objectif .....	89
4.1.2	Méthodologie .....	89
4.1.3	Déroulement des entrevues .....	90
4.1.4	Compensation financière .....	93
4.1.5	Données numériques .....	93
4.2	Recrutement des candidats.....	94
4.2.1	Candidats types recherchés.....	94
4.2.2	Recrutement .....	94
4.2.3	Candidats recrutés.....	94
4.3	Transcriptions .....	95
4.3.1	Exemple de transcription : Candidat #3, scénario #1 .....	95
4.3.2	Exemple de transcription : Question #7.....	96
4.4	Conclusion partielle .....	96
CHAPITRE 5 RÉSULTATS .....		97
5.1	Définitions.....	97
5.1.1	Termes généraux.....	97
5.1.2	Termes spécifiques proposés .....	107
5.2	Principes de chargement .....	113
5.2.1	Espace exploitable .....	114
5.2.2	Masse et répartition de la masse .....	115
5.2.3	Placement des membres .....	116
5.2.4	Cales.....	119
5.2.5	Priorités .....	120
5.2.6	Préparation .....	121
5.3	Validation des principes de chargement .....	122
5.4	Proposition d'une esquisse d'algorithme .....	122
5.4.1	Données initiales .....	122
5.4.2	Analyse et classification des membres .....	124
5.4.3	Groupement des membres.....	126

5.4.4	Placement des tranches et paquets .....	131
5.4.5	Conclusion partielle .....	131
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....		133
ANNEXE I PHOTOS DES MEMBRES MINIATURES FABRIQUÉS .....		139
ANNEXE II EXEMPLE DE TRANSCRIPTION .....		143
ANNEXE III TRANSCRIPTION DE LA QUESTION #7.....		153
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		155



## **LISTE DES TABLEAUX**

	Page
Tableau 1.1	10
Tableau 1.2	13
Tableau 1.3	22
Tableau 1.4	22
Tableau 1.5	24
Tableau 1.6	25
Tableau 3.1	76
Tableau 3.2	77
Tableau 3.3	78
Tableau 3.4	87



## LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 0.1	Remorque chargée .....	2
Figure 0.2	Exemple de membre complexe .....	3
Figure 1.1	Éléments de vocabulaire de structure d'acier .....	12
Figure 1.2	Camion .....	15
Figure 1.3	Tracteur .....	16
Figure 1.4	Semi-remorque .....	17
Figure 1.5	Remorque .....	18
Figure 1.6	Diabolo .....	19
Figure 1.7	Exemple pour la bridge formula .....	27
Figure 1.8	Architecture du modèle IFC .....	35
Figure 1.9	Étapes de la solution .....	56
Figure 2.1	Zone de chargement de l'entreprise A .....	58
Figure 2.2	Entreposage sur des semi-remorques .....	60
Figure 3.1	Poutre : (a) Test SolidXperts; (b) Test autres fournisseurs .....	68
Figure 3.2	Colonne (a) Test SolidXperts; (b) Test autres fournisseurs .....	69
Figure 3.3	Pièces fabriquées chez Shapeways .....	71
Figure 3.4	Pièces fabriquées chez SolidXperts .....	72
Figure 3.5	Pièce fabriquée au département de GPA .....	73
Figure 3.6	Pièces fabriquées au département de MEC .....	74
Figure 3.7	Capture d'écran du logiciel SDS/2 de Design Data .....	81
Figure 3.8	Membre conçu puis découpé pour l'impression 3D .....	83
Figure 3.9	Membre défectueux à cause d'une courbure .....	84

Figure 3.10	Membre imprimé à la verticale en trois sections .....	85
Figure 3.11	Placement standard des membres pour l'entrevue .....	88
Figure 4.1	Photo du résultat du scénario #1 pour le candidat #3 .....	96
Figure 5.1	Identification de la pièce principale et des pièces secondaires sur un membre .....	98
Figure 5.2	Positions d'une poutre .....	99
Figure 5.3	Exemples de membres fer à fer qui ne sont pas intercalés .....	99
Figure 5.4	Exemples de membres intercalés fer à fer .....	100
Figure 5.5	Exemple d'une boîte en forme de prisme trapézoïdal, ou « pyramide »....	100
Figure 5.6	Chaîne munie de crochets (gauche) et sangle (droite) .....	101
Figure 5.7	Exemple de pince serrant un membre .....	102
Figure 5.8	Systèmes d'axes suggérés .....	103
Figure 5.9	Plans sur une remorque .....	104
Figure 5.10	Exemple d'espace exploitable avec l'avant courbé .....	105
Figure 5.11	Positions relatives des pièces secondaires sur un membre .....	107
Figure 5.12	Surfaces de référence (en vert pointillé) sur une poutre et un angle .....	108
Figure 5.13	Enveloppe du membre .....	108
Figure 5.14	Surfaces d'appui et hauteur utile .....	109
Figure 5.15	Une tranche dont les membres sont un peu espacés .....	110
Figure 5.16	Deux paquets empilés l'un sur l'autre .....	110
Figure 5.17	Boîtes englobantes internes (en foncé) et externes (en pâle) .....	113
Figure 5.18	Ponts et risques de cassure .....	117
Figure 5.19	Exemple de membre dans le mauvais sens (rouge) .....	118
Figure 5.20	Exemple de paquets préattachés .....	121
Figure 5.21	Membres formant une tranche .....	128

Figure 5.22	Paquets formant une tranche .....	129
Figure 5.23	Unification de l'enveloppe des membres pour une tranche .....	130
Figure 5.24	Zones de placement des cales.....	131



## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AB	Alberta
AEC	<i>Architecture Engineering Construction</i>
AISC	<i>American Institute of Steel Construction</i>
BC	Colombie-Britannique ( <i>British Columbia</i> )
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CAD	<i>Computer-aided Design</i>
CAO	Conception assistée par ordinateur
CIS/2	<i>CIMSteel Integration Standards (version 2)</i>
CISC	<i>Canadian Institute of Steel Construction</i> (Français : Voir ICCA)
COMT	<i>Council of Ministers Responsible for Transportation and Highway Safety</i>
ÉTS	École de technologie supérieure
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FM	<i>Facility Management</i>
GAWR	<i>Gross axle weight rating</i>
GPA	Génie de la production automatisée
GVWR	<i>Gross vehicle weight rating</i>
ICCA	Institut canadien de la construction en acier
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i>
MB	Manitoba
MBSBPP	<i>Multiple bin size bin packing problem</i>
MEC	Génie mécanique
MHKP	<i>Multiple heterogeneous knapsack problem</i>

MIKP	<i>Multiple identical knapsack problem</i>
MTQ	Ministère des transports du Québec
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NB	Nouveau-Brunswick ( <i>New Brunswick</i> )
NL	Terre-Neuve-et-Labrador ( <i>Newfoundland and Labrador</i> )
NS	Nouvelle-Écosse ( <i>Nova Scotia</i> )
NT	Territoires du Nord-Ouest ( <i>Northwest Territories</i> )
NU	Nunavut
ON	Ontario
PE	Île-du-Prince-Édouard ( <i>Prince Edward Island</i> )
PNBE	Poids nominal brut sur l'essieu
PNBV	Poids nominal brut du véhicule
QC	Québec
SBSBPP	<i>Single bin size bin packing problem</i>
SI	Système international (d'unités)
SK	Saskatchewan
SKP	<i>Single knapsack problem</i>
STEP	<i>STandard for the Exchange of Product model data</i>
STL	Format numérique pour modèles tridimensionnels. STL vient de <i>STereoLithography</i> .
YT	Yukon

## **LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE**

cm Centimètres

kg Kilogrammes

lb Livres (masse)

m Mètres

pi. Pieds

po. Pouces



## INTRODUCTION

Le transport occupe un rôle important dans l'industrie comme dans la vie de tous les jours. Dans l'industrie de la construction de bâtiments, le transport joue un rôle clé puisqu'on doit livrer toutes les composantes à temps pour leur assemblage sur le chantier. C'est le cas pour toutes les pièces, petites ou grandes. Pour les grands bâtiments, la structure qui forme l'ossature du bâtiment correspond à de la charpente d'acier.

Cette structure d'acier doit être transportée de l'usine d'un fabricant jusqu'au lieu de construction. Les fabricants d'acier transforment des poutres, des tubes, des plaques et autres pièces d'acier en membres qui formeront cette structure. Considérant que chaque opération sur le chantier coûte significativement plus cher que celles effectuées en usine, un effort important est déployé afin que toutes les opérations de perçage, de découpe, de soudure et d'assemblage soient réalisées en usine. En effet, selon un sondage effectué auprès de 809 contracteurs, architectes et ingénieurs par McGraw-Hill Construction (2011, p. 7), 65% des répondants estiment que l'utilisation de la préfabrication et de la modularisation dans l'industrie de la construction réduirait le budget des projets de construction. Ce budget serait réduit de 6% ou plus selon 42% de ces mêmes répondants (McGraw-Hill Construction, 2011, p. 19). La préfabrication des membres d'acier complexifie davantage l'étape du transport, puisque les membres prennent des formes variées et deviennent plus difficiles à agencer ensemble sur une semi-remorque.

La Figure 0.1 donne un exemple d'une semi-remorque chargée. On peut y voir que les membres chargés sont tous plutôt différents et on peut estimer qu'au moins une quinzaine d'heures-personnes ont été nécessaires pour placer l'ensemble des membres et tailler les cales de bois afin de les adapter dans certains cas à la forme d'un membre. Cet exemple ne fait pas exception à la majorité des chargements qu'on peut observer à la sortie d'une usine de fabrication. Par contre, ils sont généralement tous différents les uns des autres, étant donné la disparité des membres.



Figure 0.1 Remorque chargée

## 0.1 Problématique

Dans la pratique actuelle, le chargement de ces membres d'acier est préparé empiriquement et avec une quantité limitée d'informations. Les préposés au chargement sont les employés qui ont pour tâche de charger les membres sur les semi-remorques. Ils disposent de la liste des membres à charger, mais ils ne disposent pas d'outils indiquant à quoi chaque membre ressemblera outre la longueur et la section de la pièce principale qui la constitue et son poids total. Ils doivent donc attendre de les avoir sous les yeux pour planifier la manière dont ils les agenceront sur la semi-remorque. Parfois, les préposés ne connaissent pas l'allure d'une partie des membres de la liste lorsqu'ils commencent le chargement. Ils peuvent donc se retrouver en fin de chargement avec un membre complexe à placer, tel qu'illustré à la Figure 0.2, sur le dessus des autres alors qu'il aurait été simple de le placer plus tôt pendant le chargement.

En plus du casse-tête que constitue le placement des membres, ils doivent veiller, tout au long du chargement, à leur propre sécurité et à celle de leurs collègues, étant donné que la

manipulation des membres constitue en soi un travail dangereux. En effet, si une erreur se produit durant la manipulation, la taille et le poids des membres sont suffisamment grands pour blesser gravement une personne se trouvant au mauvais endroit au mauvais moment. Les préposés doivent aussi s'assurer que le chargement respecte toutes les contraintes imposées par les règles de la sécurité routière, donc en plus d'être stable et solide, le chargement doit avoir une masse bien répartie sur les essieux du tracteur semi-remorque et respecter des limites dimensionnelles.

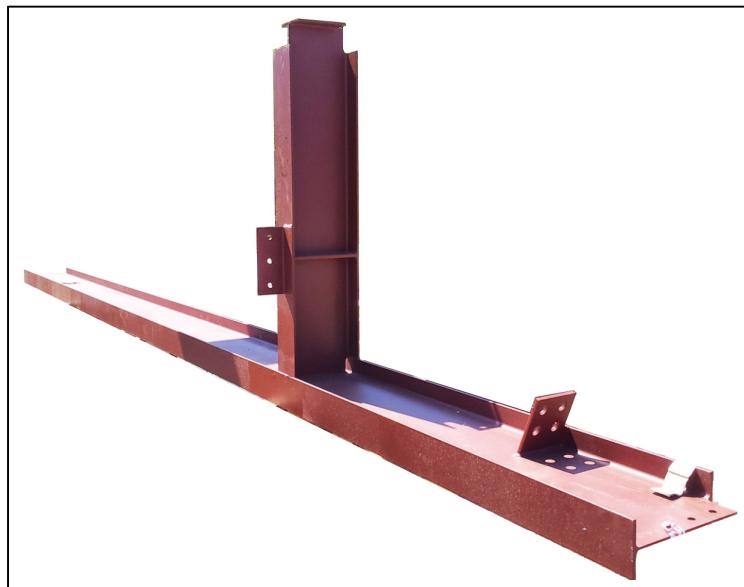


Figure 0.2 Exemple de membre complexe

Considérant que la technologie est en train de s'implanter de plus en plus dans tous les maillons de l'industrie de la construction, il est commun d'avoir sous la main les modèles numériques des pièces à fabriquer. Grâce à la disponibilité des informations sur chaque membre dans ces modèles, on voit de plus en plus de machines automatisées chez les fabricants. Ainsi, dans un domaine où presque tout le travail était accompli manuellement voilà quelques dizaines d'années, on voit maintenant apparaître des robots découpeurs, des machines automatiques d'assemblage ou de soudure, des systèmes de positionnement sophistiqués pour aider les travailleurs, etc. Dans cette optique, on en vient donc à se demander s'il serait possible d'automatiser, en partie ou en totalité, l'étape du chargement de

l'acier sur semi-remorque. Or, pour automatiser le chargement des membres sur semi-remorques, il faut d'abord savoir comment les placer.

Ainsi, une des premières étapes vers l'amélioration de ce secteur de l'usine passe par l'élaboration d'un algorithme capable de préparer automatiquement un patron de chargement indiquant comment placer chaque membre sur la semi-remorque à partir des données disponibles dans les modèles numériques. Un tel algorithme, en plus de permettre l'automatisation dans ce secteur de l'usine, constituerait un avantage certain pour les usines de fabrication. En effet, il permettrait de prévoir précisément le nombre de tracteurs semi-remorques nécessaires au transport, puisque ce nombre est actuellement estimé selon le poids total des membres. S'il est suffisamment efficace, l'algorithme pourrait permettre de diminuer le nombre de voyages nécessaires. Le fait de connaître l'emplacement final de chaque membre à fabriquer permettrait un ordonnancement de fabrication plus efficace, diminuant la nécessité d'entreposer certains membres. Dans le cas où l'automatisation du chargement n'est pas complète, le temps de chargement des membres serait tout de même réduit puisque les préposés sauraient d'avance comment placer le chargement. Ils n'auraient pas besoin de mesurer chaque membre afin de lui trouver une place, ou de faire plusieurs essais. Ils pourraient même préparer d'avance les cales de bois nécessaires pour le chargement. Ainsi, un algorithme capable de préparer des patrons de chargement apporterait plusieurs avantages.

Or, pour préparer un tel algorithme, il faut d'abord connaître la réalité du domaine. Ainsi, il faut disposer de documentation expliquant le processus actuel, ses règles, ses contraintes, et expliquant les méthodes présentement utilisées. Une telle documentation ne semble pas exister pour le moment.

## 0.2 Objectifs

L'objectif principal du projet présenté dans ce mémoire est de déterminer les principaux paramètres permettant de préparer automatiquement, à partir des modèles numériques, un

patron de chargement indiquant comment placer chaque membre d'acier sur le véhicule de transport. Ainsi, l'exploration de ce domaine a pour objectif de faire l'inventaire de l'ensemble des éléments à prendre en compte si un tel algorithme devait être développé, afin qu'il puisse les gérer adéquatement lors de la préparation des patrons de chargement. Les chargements créés doivent être sécuritaires tant pendant le transport qu'à chacune des étapes de placement; la stabilité occupe donc un rôle important. En raison de la masse et de la taille des membres à manipuler, il doit être possible de préparer les chargements avec un pont roulant donc chaque pièce doit être chargée par le dessus. Évidemment, les chargements doivent aussi respecter le code de la sécurité routière, ainsi toutes les contraintes de poids, de répartition du poids et de dimensions doivent être respectées.

Afin de répondre à l'objectif principal, plusieurs objectifs spécifiques sont définis. Le premier de ces objectifs vise à cerner l'état actuel de la connaissance relative au projet. Pour ce faire, il faut donc identifier et analyser toute la documentation pertinente concernant les cinq grands thèmes principaux qui sont couverts par ce projet. Le premier de ces thèmes concerne la charpente d'acier, pour laquelle il faut s'assurer d'utiliser les bons termes et d'être compris tant par les travailleurs que les scientifiques. Le second thème est le transport routier, où il faut non seulement utiliser le vocabulaire adéquat, mais aussi s'assurer de comprendre la réglementation Nord-Américaine qui affecte le transport de l'acier. Le troisième thème concerne les formats de fichiers numériques. Il faut se familiariser avec les différents formats de fichiers numériques qui existent pour le domaine de l'acier et identifier celui qui serait le plus adéquat à utiliser dans le contexte d'un algorithme. Le quatrième thème est la fabrication additive qui est utilisée pour fabriquer des membres miniatures destinés à interviewer des travailleurs. Finalement, le dernier des cinq thèmes touche les algorithmes de chargement. Il faut vérifier l'état de l'art dans la littérature scientifique afin de voir comment ce projet s'y inscrit et si un ou plusieurs algorithmes existants pourraient être utilisés dans le cadre de ce projet.

Le deuxième objectif spécifique vise à rendre explicites les connaissances nécessaires à la préparation et la réalisation de chargements d'acier. Ainsi, il faut visiter des entreprises afin

de comprendre le fonctionnement d'une usine de fabrication de membres d'acier dans son ensemble, mais surtout pour comprendre comment ces entreprises réalisent l'étape du chargement des membres. Il faut également cerner le raisonnement suivi par les préposés au chargement pour comprendre comment, chaque jour de travail, ils abordent la planification et la réalisation des chargements et comment ils font face aux différentes contraintes qui s'y rattachent. Pour ce faire, il faut donc créer un ensemble de membres en format réduit et interviewer des préposés au chargement de différentes entreprises pour observer, dans un environnement contrôlé, comment les différents individus abordent le problème.

Ces connaissances pourront alors être documentées en deux sections. D'abord, on proposera un vocabulaire unifié propre à ce domaine. Ce vocabulaire unifiera les cinq thèmes du premier objectif spécifique et devra pouvoir être utilisé tant par les industriels que par les scientifiques. Ensuite, on cernera les principes de chargements observés par les préposés. Il faut pouvoir distinguer ceux qui sont communs à tous de ceux qui sont spécifiques à certaines entreprises ou individus.

Ces deux premiers objectifs nous mènent au troisième et dernier objectif spécifique, celui de proposer une esquisse d'algorithme. Cette esquisse exprime les principales étapes de résolution d'un algorithme de préparation de patrons de chargement. La nature de chaque étape doit être décrite afin de former, au final, une conception préliminaire d'un cahier des charges pour le développement de l'algorithme.

Une fois ces trois objectifs spécifiques atteints, les paramètres permettant de préparer automatiquement des patrons de chargement pour membres d'acier structurel seront connus, puisque l'assemblage des résultats des trois objectifs spécifiques formera l'ensemble des paramètres à connaître.

Ce mémoire comporte cinq chapitres. Le premier constitue une revue de la littérature, donc les ouvrages consultés et retenus pour les cinq thèmes seront brièvement décrits. Les concepts tirés de ces ouvrages sont nécessaires à la compréhension du problème et ils seront également

expliqués. Le second chapitre présente la méthodologie choisie et suivie tout au long du projet. Le troisième chapitre explique la démarche suivie et les justifications des choix pour la création du matériel expérimental. Le quatrième chapitre expose la démarche suivie lors des entrevues de plusieurs préposés au chargement, alors que le cinquième et dernier chapitre décrit les résultats obtenus après les entrevues en présentant le vocabulaire unifié ainsi que les principes de chargement qui en découlent. Finalement, la conclusion de ce projet est fournie avec des recommandations pour la suite.



## CHAPITRE 1

### REVUE DE LA LITTÉRATURE ET ANALYSE DU PROBLÈME

Ce projet gravite autour de cinq thèmes principaux, soit le domaine de la charpente d'acier, le transport routier, la modélisation de données de bâtiments et ses formats d'échange, la fabrication additive et finalement les algorithmes de chargement. Ainsi, les différents articles et ouvrages consultés et retenus ont été classés selon ces cinq thèmes. Une brève description sera donnée pour chaque document et ensuite les concepts touchant ce projet seront expliqués. Par rapport spécifiquement aux algorithmes de chargement, une analyse sera effectuée afin de déterminer où se situe le présent projet par rapport à la littérature existante.

#### 1.1 La charpente d'acier

Puisque presque toutes les pièces qui seront manipulées seront normalement de la charpente d'acier, il est nécessaire d'explorer les différents termes utilisés dans ce domaine. Ainsi, nous explorerons les termes simples désignant les composantes de la charpente, puis nous verrons certains termes relatifs aux constructions. Puisqu'en Amérique du Nord, l'anglais est dominant, la traduction des termes pertinents sera également fournie.

##### 1.1.1 Littérature

L'institut canadien de la construction en acier (ICCA) (2009) présente dans son document « Code de pratique standard pour l'acier de charpente » les pratiques courantes à suivre de la conception à la construction d'un bâtiment utilisant une charpente d'acier. Cet ouvrage a été retenu principalement pour les définitions des termes relatifs à la charpente d'acier.

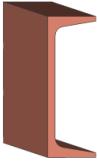
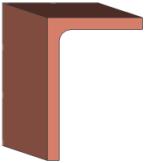
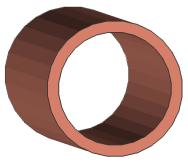
Charles Albert et l'ICCA (2010) présentent un lexique qui se veut une référence rapide pour la traduction anglaise-française (ou inversement) des différents termes techniques qui s'appliquent au domaine de la charpente d'acier.

### 1.1.2 Charpente d'acier

Le Tableau 1.1 liste et décrit plusieurs types de pièces pouvant composer la charpente d'acier. Il s'agit d'une synthèse basée sur quelques sources, dont principalement l'Office québécois de la langue française (OQLF) et l'ICCA. Leur traduction est incluse entre parenthèses. Parfois, plusieurs termes différents sont possibles. Les traductions sont basées soit sur Albert et ICCA/CISC (2010) ou plusieurs pages du grand dictionnaire terminologique de l'OQLF.

Tableau 1.1 Termes de charpente d'acier

<p><b>Poutre ou profilé en I (I Beam)</b> C'est le terme générique servant à identifier une des pièces les plus utilisées en construction. Il en existe plusieurs types dont quelques-uns sont illustrés dans le présent tableau.</p>	
<p><b>Semelle, aile ou membrure (Flange)</b> « Partie constitutive d'une poutre perpendiculaire aux extrémités de l'âme qui est la partie moyenne. » (OQLF, 1983) Par exemple, une poutre en I comporte deux semelles.</p>	
<p><b>Âme (Web)</b> Pour une poutre ou un profilé, il s'agit généralement de la partie verticale, soit celle faisant le lien entre les semelles, tel qu'indiqué par l'OQLF (2000). Pour une poutre en I, il s'agit de la partie centrale liant les deux semelles.</p>	
<p><b>Poutre à ailes larges (Wide Flange Beam)</b> Tel que décrit par l'OQLF (1982), une poutre à ailes large est une poutre en I dont les ailes sont normalement plus épaisses que l'âme.</p>	
<p><b>Pieu porteur ou en H (Bearing Pile)</b> Profilé en I dont la semelle et l'âme ont sensiblement la même épaisseur. Généralement utilisé comme pieu dans le sol ou dans le béton.</p>	

<p><b>Poutrelle américaine normalisée (American standard beam)</b> Poutre en I dont les faces intérieures des semelles sont inclinées.</p>	
<p><b>Profilé en U ou en C (Channel)</b> Poutre dont l'âme est latérale au lieu d'être centrale. Les semelles ont généralement leur face intérieure inclinée. (OQLF, 1984)</p>	
<p><b>Poutre ou profilé en T ou Té (Tee ou T-Section Beam)</b> Poutre ou profilé qui ne comporte qu'une seule semelle et une âme centrée sur la semelle. Il peut s'agir de poutre en I coupée en deux sur la longueur de l'âme.</p>	
<p><b>Tube d'acier laminé sans soudure (HSS Tube – Hot-rolled seamless steel tube)</b> Tube de forme rectangulaire où aucune soudure de jonction n'est apparente.</p>	
<p><b>Cornière ou angle (Angle)</b> Poutre ou profilé en forme de L dont les deux côtés peuvent ou non être de même longueur.</p>	
<p><b>Tube rond (Round pipe)</b> Cylindre d'acier dont l'intérieur est vide.</p>	
<p><b>Plaque ou tôle (Plate)</b> Plaque d'acier.</p>	

### 1.1.3 Structure d'acier

Beaucoup de termes différents existent pour la structure d'acier. Tous ces termes ne seront pas définis, par contre la Figure 1.1 présente quelques exemples de termes utilisés pour décrire certains éléments composant une structure d'acier.

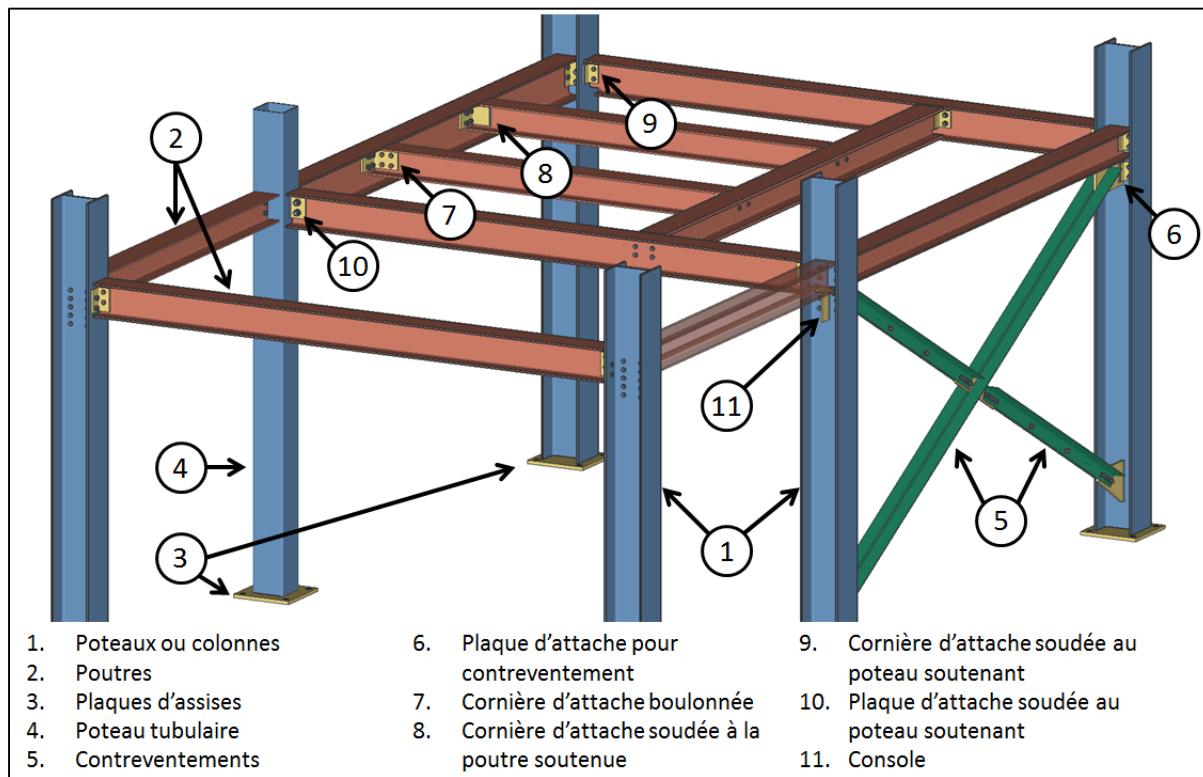


Figure 1.1 Éléments de vocabulaire de structure d'acier  
Certains termes tirés de ICCA (2009)

Voici également, au Tableau 1.2, la traduction de quelques-uns des termes principaux à retenir, puisqu'avec ces termes on peut nommer la majorité des pièces d'acier formant un bâtiment.

Tableau 1.2 Traduction de quelques termes  
Traductions tirées de Albert et ICCA/CISC (2010)

Français	Anglais
Poutre	Beam
Contreventement	Brace ou Bracing
Poteau ou Colonne	Column
Traverses	Girt
Pannes	Purlin

## 1.2 Le transport routier

Étant donné que ce projet est lié au transport routier, il est nécessaire de connaître les termes et les normes qui y sont reliés. Plusieurs ouvrages ont donc été consultés dans le but de cerner la terminologie exacte à utiliser ainsi que les normes de dimensions et de poids applicables au Québec, au Canada et aux États-Unis. Ces informations devraient être considérées dans un algorithme afin de pouvoir respecter les normes selon la route empruntée. Les éléments considérés dans cette section omettent les exceptions qu'il est possible d'obtenir dans les différentes régions. En effet, au cas par cas, la permission de dépasser les normes de dimensions peut être accordée à condition d'avoir un permis spécial délivré par le gouvernement. Le présent mémoire ne considère pas ces permissions spéciales, étant donné qu'elles peuvent être différentes pour chaque province ou état.

### 1.2.1 Littérature

Le ministère des transports du Québec (MTQ) (2013) présente un guide permettant de classer les différents types de véhicules et les charges et dimensions maximales applicables sur les routes du Québec.

Le Conseil des ministres responsables des transports et de la sécurité routière (COMT) (2011) présente un règlement indiquant les limites du poids et de la dimension des véhicules

lourds effectuant du transport interprovincial au Canada. Il présente donc les dimensions et poids que toutes les provinces doivent permettre sur leur territoire. Les provinces peuvent décider de permettre des dimensions ou des masses plus grandes, mais celles imposées par le fédéral doivent être permises partout au Canada.

Joseph F. Schulman (2003) présente dans son rapport différentes statistiques ayant trait au transport routier de marchandises ainsi que les réglementations spécifiques au Canada et à chacune des provinces. On peut donc y consulter rapidement les différences entre l'accord canadien et chacune des provinces.

La Federal Highway Administration (FHWA) des États-Unis (2004) et (2006) présente dans ses deux documents les règlements fédéraux ayant trait aux dimensions des véhicules commerciaux ainsi que la formule pour déterminer le poids maximal des camions et tracteurs semi-remorques selon l'espacement de leurs essieux, avec la « Bridge Formula ». Ainsi, les normes présentées dans ces deux documents sont en général minimalement tolérées dans tous les états.

### **1.2.2 Terminologie**

Voici plusieurs termes utilisés dans le monde du transport. Plusieurs sources ont été explorées, ainsi, plusieurs définitions seront parfois données selon le contexte ou la région. Les traductions sont basées sur la comparaison des versions françaises et anglaises du règlement fourni par le COMT (2011).

#### **1.2.2.1 Camion (Truck)**

Un camion est défini comme étant un « [v]éhicule industriel qui circule sur les routes soit pour transporter des marchandises, soit pour assurer l'entretien et la sécurité des villes. » (OQLF, 2001). Le Ministère des transports du Québec fournit dans son « Guide des normes de charges et dimensions des véhicules » (édition 2005) une image d'un camion, sans en fournir de définition, disponible à la Figure 1.2.



Figure 1.2 Camion  
Tiré de MTQ (2005, p. 9) avec autorisation

De plus, le guide canadien donne une définition d'un terme semblable, soit un camion porteur :

Véhicule à moteur, autre qu'un autocar, qui est muni en permanence d'un dispositif conçu spécialement pour le transport d'une charge, ou qui est lui-même conçu pour le transport d'une charge et est normalement utilisé à cette fin, seul ou suivi d'une remorque autre qu'une semi-remorque. (COMT, 2011, p. 26)

Ainsi, dans le présent mémoire le terme camion sera utilisé comme un terme général pour tout véhicule adapté en permanence au transport de marchandises. Bien que l'ensemble routier formé d'un tracteur et d'une semi-remorque (définitions ci-dessous) puisse être considéré comme un camion, nous utiliserons plutôt le terme tracteur semi-remorque pour désigner ce type de véhicule spécifique.

### 1.2.2.2 Véhicule lourd

Au Québec, sont considérés comme véhicules lourds « les véhicules routiers, au sens du Code de la sécurité routière, dont le poids nominal brut est de 4 500 kg ou plus et les ensembles de véhicules routiers au sens de ce code dont le poids nominal brut combiné totalise 4 500 kg ou plus. » (Gouvernement du Québec, 2012, art. 2 al. 3). Ainsi, tout véhicule excédant la masse de 4 500 kg ou dont la capacité de chargement permet de dépasser cette masse est considéré comme lourd au sens de la loi, en plus d'autres véhicules spécifiques qui ne sont pas reliés au présent projet. Cette valeur peut cependant varier selon les autres provinces ou états en Amérique du Nord, celui-ci étant spécifique au Québec.

### 1.2.2.3 Tracteur (Tractor)

Les définitions du Québec et du Canada étant très similaires, voici celle du Québec : « un véhicule automobile muni d'une sellette d'attelage fixée sur le dessus de son cadre de châssis à laquelle s'accouple une semi-remorque. » (MTQ, 2013, p. 4) La définition canadienne est très similaire mais ne précise pas la sellette d'attelage. (COMT, 2011)

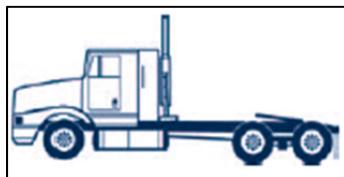


Figure 1.3 Tracteur  
Tirée de MTQ (2005, p. 7) avec autorisation

### 1.2.2.4 Semi-remorque (Semitrailer)

Le guide québécois identifie une semi-remorque comme étant « [u]n véhicule routier dont l'avant porte sur la sellette d'attelage fixée sur le dessus du cadre de châssis du véhicule qui le tire. » (MTQ, 2013, p. 3) Bien que cette description soit accompagnée d'une image, elle fait abstraction de la répartition du poids telle que définie dans le guide canadien :

Véhicule conçu pour être remorqué par un autre véhicule et qui est ainsi conçu et utilisé de manière qu'une bonne partie de son poids et de son chargement repose sur l'autre véhicule ou le diabolo remorqué ou est porté par celui-ci à l'aide de la sellette d'attelage combinée au pivot d'attelage. (COMT, 2011, p. 29)

Cette description permet de mieux comprendre le fait que la semi-remorque est conçue spécialement pour que son poids soit partiellement réparti sur le véhicule auquel elle est attachée, que ce soit un tracteur, un diabolo ou une autre semi-remorque.

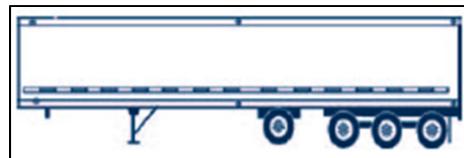


Figure 1.4 Semi-remorque  
Tirée de MTQ (2005, p. 7) avec autorisation

Nous retrouverons donc très souvent des véhicules nommés tracteurs semi-remorques, constitués tel que mentionné d'un tracteur avec une semi-remorque.

#### 1.2.2.5 Semi-remorque plateau (Flatbed semi-trailer)

Une semi-remorque plateau est définie comme étant une « semi-remorque munie d'une carrosserie constituée d'un seul soubassement supportant un plancher servant de plan de chargement pour la marchandise transportée. » (OQLF, 1996) Il s'agit donc d'une semi-remorque qui n'a ni murs ni plafond et dont la marchandise, exposée à l'air libre, est attachée au plan de chargement à l'aide de chaînes, de câbles ou de sangles.

#### 1.2.2.6 Remorque (Full trailer)

Le guide québécois définit une remorque comme étant « un véhicule routier, y compris une semi-remorque dont l'avant porte sur un diabolo, relié au véhicule qui le tire par un système d'attache autre qu'une sellette d'attelage fixée sur le dessus de son cadre de châssis. » (MTQ, 2013, p. 3) Encore une fois, cette description fait abstraction de la répartition du poids tel qu'indiqué dans le guide canadien :

Véhicule conçu pour être remorqué par un autre véhicule, qui est ainsi conçu et utilisé pour que la totalité de son poids et le chargement reposent sur ses propres essieux et qui comprend un ensemble constitué d'une semi-remorque et d'un diabolo remorqué. (COMT, 2011, p. 28)

Une remorque ne distribue donc pas son poids vers un autre véhicule. Ses propres essieux sont les seuls qui comptent dans la détermination du poids limite qu'elle peut transporter. Des exemples de remorques sont donnés à la Figure 1.5.



Figure 1.5 Remorque  
Tirée de MTQ (2005, p. 7) avec autorisation

#### 1.2.2.7 Remorque semi-portée (Pony Trailer)

Une remorque semi-portée repose un peu à mi-chemin entre une semi-remorque et une remorque. Sa définition dans le guide canadien est :

Véhicule qui est conçu pour être remorqué par un autre véhicule et qui est muni d'un timon rigide fixé à la structure de la remorque. Il est conçu et utilisé de manière à ce que la majeure partie de sa masse et de sa charge repose sur ses propres essieux. (COMT, 2011, p. 28)

Ainsi, le timon rigide peut transmettre une petite partie de la masse, mais la majeure partie reste supportée par les essieux de la remorque semi-portée.

#### 1.2.2.8 Poids nominal brut sur l'essieu (PNBE) (Gross axle weight rating (GAWR))

Le guide québécois définit le PNBE comme étant « la capacité maximale d'un essieu au sens du Règlement sur la sécurité des véhicules automobiles » (MTQ, 2013, p. 3) Ainsi, tel qu'indiqué par le MTQ (2013), PNBE signifie poids nominal brut sur l'essieu alors que GAWR signifie gross axle weight rating. La somme des PNBE d'un véhicule détermine normalement le PNBV du véhicule.

### **1.2.2.9 Poids nominal brut du véhicule (PNBV) (Gross vehicle weight rating (GVWR))**

Selon la loi au Québec, la valeur spécifiée par le fabricant comme poids d'un seul véhicule en charge peut avoir l'appellation «poids nominal brut du véhicule», «PNBV», «gross vehicle weight rating» ou «GVWR» » (Gouvernement du Québec, 2012, art. 2 al. 4) Il est important de considérer les termes « en charge » comme signifiant qu'il faut inclure la masse de la charge pour laquelle le véhicule est normalisé.

### **1.2.2.10 Diabolo ou Diabolo remorqué (Trailer Converter Dolly)**

Selon le guide québécois, un diabolo est « un avant train à sellette utilisé pour convertir une semi-remorque en remorque. » (MTQ, 2013, p. 2) Dans le même sens, le guide canadien le défini par « Véhicule comprenant au moins un essieu, une sellette d'attelage et un timon utilisés pour convertir une semi-remorque en remorque » (COMT, 2011, p. 26)



Figure 1.6 Diabolo  
Tirée de MTQ (2005, p. 7) avec autorisation

Bien que l'exemple de la Figure 1.6 soit constitué de deux essieux, le diabolo peut en comporter seulement un, ou plusieurs, selon la répartition de masse nécessaire. Il existe également quelques types de diabolos différents selon la configuration des pièces qui le constituent. Il sera parfois articulé au point d'attache du timon, d'autres fois au point d'attache de la sellette d'attelage.

### **1.2.2.11 Timon (Drawbar)**

Le timon est défini au niveau canadien comme un « élément de la structure d'une remorque ou d'une remorque semi-portée ou d'un diabolo remorqué muni d'un dispositif d'accrochage au crochet ou à la sellette d'attelage. » (COMT, 2011, p. 29) Il s'agit donc en quelque sorte du bras faisant le lien entre le véhicule remorqué et le véhicule remorqueur.

### **1.2.2.12 Essieu (Axe)**

Un essieu est un « ensemble de deux roues ou plus dont les axes sont dans un même plan vertical transversal et qui transmet le poids à la chaussée. » (COMT, 2011, p. 27) Tout véhicule doit donc être constitué d'au moins deux essieux afin de tenir son équilibre. Le nombre d'essieux d'un véhicule ainsi que leur répartition en groupes permet de déterminer quelle sera la charge maximale que le véhicule pourra transporter.

### **1.2.2.13 Groupe d'essieux tandem (ou triple) (Tandem (Tridem) Axle Group)**

Un groupe d'essieux sert à répartir également le poids entre plusieurs essieux. Ainsi, un groupe d'essieux tandem est :

Un ensemble de 2 essieux reliés au véhicule par un système de suspension conçu pour égaleriser, à 1000 kg près, en tout temps, la masse pouvant être mesurée sous les roues de chacun des essieux et composé d'une suspension commune ou de 2 suspensions identiques reliées entre elles. (MTQ, 2013, p. 3)

Le groupe d'essieux triple ou tridem sera quant à lui constitué de trois essieux, toujours avec la limitation de 1000 kg de différence maximale entre les différents essieux.

### **1.2.2.14 Train double**

Les trains doubles, aussi appelés trains routiers, sont les ensembles formés de plus de deux véhicules. Il en existe trois types : A, B et C. Ils sont définis selon la configuration des

différents véhicules du train, ce qui modifie la manière dont le véhicule est articulé. Par exemple, le train double de type A est défini comme étant un « [e]nsemble routier constitué d'un tracteur et d'une semi-remorque suivis soit d'un diabolo à simple timon et d'une semi-remorque, soit d'une deuxième remorque attachée à la première comme si un diabolo à simple timon était utilisé. » (COMT, 2011, p. 29) Le train double de type B est constitué pour sa part d'une sellette d'attelage à même la première semi-remorque, alors que le type C comporte un diabolo à double timon.

Pour conclure cette section, bien qu'une multitude de termes aient été définis, le principal type de véhicule concerné par ce projet est le tracteur semi-remorque plateau. C'est généralement ce type de véhicule qui est utilisé pour assurer le transport de charpente d'acier. De plus, les autres types de véhicules disposent d'un espace de chargement généralement similaire à celui d'une semi-remorque plateau.

### **1.2.3 Normes**

Maintenant que la terminologie est plus claire, il faut s'intéresser aux normes applicables en Amérique du Nord afin de pouvoir déterminer les grandeurs et la masse maximale du chargement selon la route qui sera empruntée. Ces normes formeront donc les limites les plus basiques à appliquer à un algorithme. Nous nous limiterons cependant aux tracteurs semi-remorques pour les normes étant donné que ce sont les principaux véhicules utilisés pour le transport de l'acier. Les États-Unis n'utilisant pas les unités du système international (SI), les masses et longueurs seront conservées dans leur unité originale, soit la livre (lb), les pouces (po.) et pieds (pi.) respectivement lorsqu'il s'agit spécifiquement des États-Unis, alors qu'elles seront converties et données dans les deux systèmes lorsqu'il s'agit de l'Amérique du Nord.

#### **1.2.3.1 Normes de dimensionnement**

Les normes de dimensionnement sont les mêmes partout au Canada. Nous retrouvons donc les dimensions hors-tout maximales suivantes pour les tracteurs semi-remorques :

Tableau 1.3 Dimensions maximales au Canada  
Valeurs tirées de COMT (2011)

Dimension	Valeur maximale (m (pi.))
Longueur totale	23 (75)
Longueur de la semi-remorque	16,2 (53)
Largeur totale	2,6 (8,5)
Hauteur totale	4,15 (13,6)

Par contre, aux États-Unis, les normes sont régulées par chacun des états. Il y a cependant des directives générales fédérales afin d'avoir une norme permissible partout dans le pays. Ainsi, voici le même tableau pour les États-Unis :

Tableau 1.4 Dimensions maximales aux États-Unis  
Valeurs tirées de FHWA (2004)

Dimension	Valeur maximale (m (pi.))
Longueur totale	N/A
Longueur de la semi-remorque	14,63 (48)
Largeur totale	2,6 (8,5)
Hauteur totale	4,11 (13,5)

On peut voir que le fédéral n'impose pas de longueur totale, ce sont donc les états qui peuvent imposer cette limite. Par contre, le fédéral impose une longueur de semi-remorque que tous les états doivent permettre, soit 48 pi. Les états sont cependant libres de permettre des dimensions maximales plus grandes s'ils le désirent. Il est intéressant de constater que bien que la majorité des états utilisent la limite de 48 pi. fédérale, certains permettent de plus grandes longueurs. Plusieurs états permettent les 53 pi., comme au Canada, et la plus grande longueur permise est en Louisiane et en Oklahoma avec 59 pi. 6 po.

La hauteur totale n'est pas donnée comme un minimum à respecter pour tous les états, mais plutôt comme une indication. En effet, le document indique que la plupart des limites de hauteur se situent entre 13 pi. 6 po. et 14 pi.

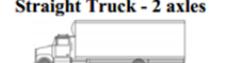
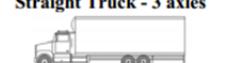
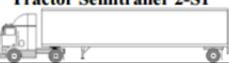
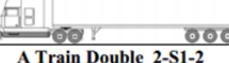
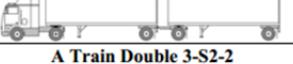
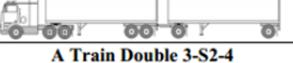
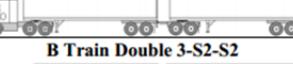
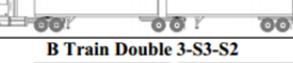
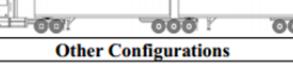
#### **1.2.3.2 Normes de charge maximale**

Les normes de charges maximales sont un peu plus complexes. En effet, chaque province canadienne a le droit de définir ses propres normes, de même pour les états américains. Ainsi, nous les observerons plus en détail pour le Canada, alors que pour les États-Unis nous nous fierons aux directives fédérales.

#### **1.2.3.3 Répartition des tonnes.kilomètres parcourues**

Avant de comparer les différentes normes de charges, il est intéressant de regarder la répartition approximative des types de camions et tracteurs semi-remorques selon le nombre de tonnes.kilomètres parcourues en 1997, indiqué au Tableau 1.5.

Tableau 1.5 Répartition des tonnes.kilomètres parcourues en 1997  
Tiré de NAFTA (1997, p. 31)

<i>Trucking Fleet Profiles - Estimated Tonne-Km Carried by Configuration Type</i>	<i>Canada</i>	<i>United States</i>	<i>Mexico</i>
<b>Straight Truck - 2 axles</b> 	9.7 %	35.5 %	8.3 %
<b>Straight Truck - 3 axles</b> 	2.3 %	4.9 %	15.3 %
<b>Tractor Semitrailer 2-S1</b> 		1.6 %	
<b>Tractor Semitrailer 2-S2</b> 		5.5 %	
<b>Tractor Semitrailer 3-S2</b> 	51.0 %	42.2 %	35.2 %
<b>Tractor Semitrailer 3-S3</b> 	18.5 %	3.0 %	37.3 %
<b>A Train Double 2-S1-2</b> 		2.7 %	
<b>A Train Double 3-S2-2</b> 	5.2 %	0.3 %	
<b>A Train Double 3-S2-4</b> 		0.4 %	2.5 %
<b>B Train Double 3-S2-S2</b> 	5.3 %		
<b>B Train Double 3-S3-S2</b> 	7.9 %		
<b>Other Configurations</b>	0.1 %	3.9 %	1.4 %

Ce tableau nous démontre clairement que la très forte majorité des tonnes.kilomètres parcourues en Amérique du Nord le sont sur des tracteurs semi-remorques à cinq essieux, puis viennent ensuite les six essieux. Évidemment ce tableau est biaisé par le fait que normalement, les plus gros véhicules parcourent de plus longues distances, ainsi les petits camions obtiennent un pourcentage plus faible malgré leur nombre très important. Bien que cela ne soit pas spécifique au transport de la charpente d'acier, si une configuration de base devait être choisie, ce serait probablement le tracteur semi-remorque à cinq essieux.

### 1.2.3.4 Normes de charges au Canada

Au Canada, on peut en quelque sorte séparer le pays en deux. Les provinces de la Colombie-Britannique (BC), de l'Alberta (AB), de la Saskatchewan (SK) et du Manitoba (MB) forment la première moitié à l'Ouest, alors que l'Ontario (ON), le Québec (QC), le Nouveau-Brunswick (NB), la Nouvelle-Écosse (NS), l'Île-du-Prince-Édouard (PE) et Terre-Neuve-et-Labrador (NL) forment l'autre moitié à l'Est. On remarque alors que la moitié Ouest est un peu plus sévère que la moitié Est. Voici donc un tableau représentant la masse totale maximale, en kilogrammes, des tracteurs semi-remorques selon le nombre d'essieux qu'ils ont. L'étoile signifie que la norme est la même que l'accord canadien.

Tableau 1.6 Limites de masse pour les tracteurs semi-remorques au Canada (kg)  
Adapté de Schulman (2003, p. 14)

Nombre d'essieux	Accord canadien	BC	AB	SK	MB	ON	QC	NB	NS	PE	YT	NL	NT
3	23,700	*	*	*	*	26,300	*	*	*	*	*	25,500	*
4	31,600	32,800	*	*	*	35,800	*	32,600	32,600	32,600	32,600	34,600	*
5	39,500	*	*	*	*	44,100	41,500	41,500	41,500	41,500	41,500	43,700	*
6	46,500	*	*	*	*	50,500	49,500	49,500	49,500	49,500	49,500	48,600	*

Le Nunavut (NU) n'est pas dans ce tableau puisqu'il n'y est pas non plus dans l'ouvrage de Schulman (2003). De plus, une colonne a été retirée, il s'agissait d'une deuxième colonne pour l'Ontario pour des configurations de véhicules spécifiques. On constate également en regardant ce tableau qu'en respectant les normes du Québec, on peut rouler partout dans la partie Est du Canada, soit dans toutes les provinces maritimes en plus de l'Ontario, excepté à Terre-Neuve-et-Labrador. Si on désire cependant se rendre dans l'Ouest du Canada, il faudra appliquer les normes de l'accord canadien, qui sont un peu plus sévères.

### 1.2.3.5 Normes de charges aux États-Unis

Aux États-Unis, le calcul de la charge maximale allouable est un peu différent. Il se fait à l'aide d'une formule qui se base sur le nombre d'essieux dans un groupe et la distance maximale séparant les essieux du groupe. Cette formule a été créée afin de s'assurer que les véhicules n'endommageraient pas les ponts. Dans tous les cas, le poids maximal total d'un véhicule ne doit jamais excéder 80 000 lb, soit un peu moins de 36 300 kg.

De plus, chaque essieu simple ou groupe d'essieux compris dans une distance de 40 po. ne doit en aucun cas excéder une charge de 20 000 lb et chaque groupe d'essieux tandem séparé par une distance comprise entre 40 et 96 po. ne doit pas excéder une charge de 34 000 lb.

La formule est nommée la « Bridge Formula » qui a été introduite en 1975. Elle est donnée comme suit (FHWA, 2006) :

$$W = 500 \left( \frac{LN}{N - 1} + 12N + 36 \right) \quad (1.1)$$

Où :

- L est la distance en pieds séparant les essieux externes entre deux groupes d'essieux consécutifs,
- N est le nombre d'essieux total dans le groupe en considération,
- W est la masse totale maximale pour le groupe considéré.

La méthodologie consiste à utiliser la formule pour le véhicule entier, puis pour chaque sous-combinaison de groupes d'essieux possible. L'exemple donné, tiré de FHWA (2006, p. 8), concerne un tracteur semi-remorque à cinq essieux dont la masse totale est 80 000 lb. La distance entre chaque groupe d'essieux est illustrée sur la Figure 1.7 :

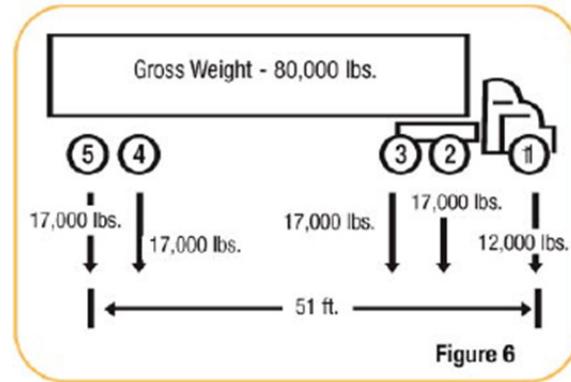


Figure 1.7 Exemple pour la bridge formula  
Tiré de FHWA (2006, p. 8) avec autorisation

Selon cet exemple, la première application de la formule, avec les cinq axes, nous donne 80 000 lb, ce qui fait que le véhicule est dans les normes. Ensuite, on calcule la masse maximale pour les trois premiers axes. Si on additionne le poids réparti des trois axes, nous obtenons 46 000 lb, alors que selon la formule, pour un espacement de 20 pi. (non illustré), la masse maximale serait de 51 000 lb. Ainsi, on est toujours conforme.

Par contre, si on calcule la formule pour les quatre derniers essieux, on obtient une valeur maximale de 65 500 lb, sauf que la masse donnée par la somme des masses sur chaque essieu nous donne 68 000 lb. De ce fait, ce véhicule ne serait pas conforme, toujours selon FHWA (2006).

Ainsi on peut voir que le calcul de la charge maximale admissible pour les États-Unis est une étape un peu plus complexe qu'au Canada.

#### 1.2.4 Conclusion

On peut voir que la masse maximale du chargement peut varier selon plusieurs variables, soit la capacité théorique de la remorque de par sa conception et la capacité maximale autorisée par la loi sur le trajet emprunté par le véhicule. Ainsi, la capacité maximale qui devra être appliquée lors du chargement sera évaluée au cas par cas, ce qui impose d'avoir, pour chaque remorque à charger, les informations pertinentes disponibles. Le système de planification

doit donc être en mesure de tenir compte de plusieurs paramètres tels que les provinces ou états où circulera le chargement, la nature du véhicule à charger, etc. Au final, ce sera généralement soit le chauffeur du véhicule ou la compagnie de transport qui sera en mesure d'indiquer les valeurs limites à respecter.

### **1.3 La modélisation de données de bâtiments et ses formats d'échange**

La modélisation de données de bâtiments (OQLF, 2008), c'est-à-dire le building information modeling (BIM) en anglais, est une technologie visant à aider la création et l'utilisation de modèles de bâtiments qui seront utiles autant pour l'architecte imaginant le bâtiment que pour le responsable de l'entretien une fois le bâtiment complété. Ce sujet est exploré dans le cadre de ce projet étant donné que les informations de modélisation des membres d'acier doivent être disponibles et que le BIM, mais plus particulièrement ses formats d'échange en seront une des principales sources.

#### **1.3.1 Littérature**

Le National Institute of Standards and Technology (NIST) (2012) présente sur sa page web les deux formats d'échange ouverts pour l'acier structurel, soit le CIMSteel Integration Standards (CIS/2) et l'Industry Foundation Classes (IFC). Ces deux formats sont brièvement présentés et plusieurs liens vers différentes ressources sont listés. Un traducteur permettant de convertir des fichiers CIS/2 vers IFC est également présenté.

Chris Moor (2011) qui, lors de la publication, occupait le rôle de directeur des initiatives de l'industrie de l'American Institute of Steel Construction (AISC), présente dans ce bref article la stratégie adoptée par l'AISC concernant l'interopérabilité des modèles numériques dans le domaine de l'acier. Il présente donc la vision à court, moyen et long terme concernant les formats numériques d'échange pour l'industrie de l'acier, dont principalement l'adoption graduelle de l'IFC comme format d'échange.

Chuck Eastman et al. (2011) présentent, dans leur ouvrage sur le BIM, une nouvelle approche utile au domaine de la construction qui touche tous les domaines, de l'architecture à la maintenance. Le chapitre 3 de cet ouvrage est celui qui touche le plus le présent projet, puisqu'il aborde le sujet de l'interopérabilité.

Lachmi Khemlani (2004) et (2005) présente dans ses deux articles comment fonctionnent respectivement l'IFC et le CIS/2. Ces articles ne sont pas une explication exhaustive du fonctionnement, mais plutôt une explication sommaire qui a pour but de renseigner une personne non-initiée sur les généralités de ces deux formats. Ils sont donc très pertinents au présent projet pour les personnes qui ne sont pas des programmeurs.

### 1.3.2 Définition

Une définition du BIM peut être trouvée dans l'ouvrage d'Eastman et al. (2011) :

[...] we define BIM as a modeling technology and associated set of processes to produce, communicate, and analyze building models. Building models are characterized by:

- Building components that are represented with digital representations (objects) [...], as well as parametric rules that allow them to be manipulated in an intelligent fashion.
- Components that include data that describe how they behave, as needed for analyses and work processes [...].
- Consistent and nonredundant data [...].
- Coordinated data [...]. (Eastman et al., 2011, p. 16)

Ainsi, on voit clairement qu'il ne s'agit pas que d'un modèle tridimensionnel du bâtiment, mais bien d'un outil complexe supportant tout le cycle de vie du bâtiment. Beaucoup d'informations sont donc enregistrées dans ce modèle, autant les données structurelles, mécaniques et électriques que des données relatives aux coûts, aux procédures d'entretien ou d'urgence, etc. De ce fait, cette technologie est intéressante pour ce projet étant donné que les fichiers BIM contiendront normalement le modèle du bâtiment, dont toutes les composantes structurelles qui seront à transporter et qui pourront en être extraites. Ce type de fichier sera

donc la source primaire de données qui alimentera l'algorithme d'imbrication des pièces de charpente d'acier.

### **1.3.3 Fonctionnement du BIM**

Le BIM n'est pas un logiciel mais bien une technologie et une méthodologie dictant des règles à respecter, des éléments à intégrer et des méthodes à suivre. Ainsi, c'est aux compagnies qui développent des suites logicielles de développer leur propre adaptation du BIM.

#### **1.3.3.1 Logiciels**

Ainsi, plusieurs plateformes logicielles différentes existent pour faire du BIM. Voici une liste non-exhaustive tirée du livre d'Eastman et al. (2011, section 2.6) :

- Revit, par Autodesk;
- Bentley Architecture, de Bentley;
- ArchiCAD, de Graphisoft;
- Digital Project, de Gehry Technologies;
- Vectorworks, par Nemetschek;
- Tekla Structures, par Tekla Corp;
- DProfiler, de Beck Technologies.

Ces logiciels sont tous des solutions intégrant le BIM à leur manière. Ils ont chacun leurs formats de fichiers respectifs, leurs avantages et inconvénients, mais ils ont également au cœur de leur fonctionnement plusieurs points en commun.

### 1.3.3.2 Modélisation paramétrique orientée objet

Le plus gros point commun est qu'ils sont tous basés sur la modélisation paramétrique orientée objet, tel que dicté par le BIM. « Object-based parametric modeling was originally developed in the 1980s for manufacturing. » (Eastman et al., 2011, p. 31) Ce type de modélisation, développé d'abord pour les applications manufacturières, vise à donner des valeurs à certains paramètres préétablis plutôt que de seulement modéliser des formes pour ensuite les assembler. (Eastman et al., 2011)

Ainsi, tel qu'expliqué par Khemlani (2004), chaque élément dans le modèle est un objet à part entière, appartenant à une classe. Cette classe fait partie d'une hiérarchie de classes qui contiennent tous les attributs nécessaires pour définir l'objet. Il y a également des classes permettant de faire des liens, parfois nommées méthodes, entre d'autres objets, permettant ainsi de créer, par exemple, un objet « pièce » en associant quatre murs, un plancher et un plafond. Chacun de ces éléments est lui-même un objet à part entière comportant ses propres attributs. L'ensemble formant la pièce peut ensuite faire partie d'un étage, qui lui-même fera partie d'un bâtiment, etc.

Les modèles tridimensionnels peuvent ensuite être générés depuis l'ensemble des objets étant donné que chaque objet aura ses propres caractéristiques de modélisation. Ainsi, l'aspect de visualisation du bâtiment devient possible.

En plus de la hiérarchie de classes, les fichiers BIM contiennent un index de règles ou de méthodes à respecter ou à intégrer entre les différents objets. Ces règles, tel qu'indiqué par Eastman et al. (2011), assurent non seulement que les objets peuvent coexister entre eux, mais permettent également d'automatiser certaines tâches de redimensionnement, de placement ou de quantité, entre autres. Ainsi, par exemple, la porte ne peut pas être plus haute que le mur sur laquelle elle est située. Si un mur est déplacé, les murs s'y raccordant doivent changer de dimensions. Pour pouvoir supporter un mètre de neige, le toit doit avoir telles qualités structurelles.

Ainsi, chaque suite logicielle incorpore ses propres classes et ses propres règles. Il existe même des extensions de ces classes, développées par la communauté ou par l'éditeur du logiciel, comme modules à ajouter au logiciel.

#### 1.3.4 Les formats d'échange

En ayant plusieurs éditeurs qui développent des logiciels différents, les fichiers qui en découlent ne sont pas nécessairement compatibles entre eux. Cela crée donc des difficultés lorsque plusieurs partis doivent travailler ensemble sur un même projet, chaque parti pouvant disposer d'une suite logicielle différente.

Ainsi, des formats d'échange de données ont été développés dans le but d'assurer l'interopérabilité entre les différents logiciels. L'idée est que si un format universel d'interopérabilité existe, alors les développeurs de logiciels n'ont qu'à créer deux traducteurs : l'un pour exporter le modèle vers le format ouvert, l'autre pour l'importer vers son propre modèle. Bien entendu, il existe plus qu'un format ouvert. Pour le BIM, il en existe deux principaux :

Two main building product data models are the Industry Foundation Classes (IFC) – for building planning, design, construction and management, and CIMsteel Integration Standard Version 2, (CIS/2) – for structural steel engineering and fabrication. (Eastman et al., 2011, pp. 99-100)

Ces deux formats de fichiers, l'IFC et le CIS/2, seront donc explorés dans les prochaines sections afin de voir leurs avantages, leurs inconvénients et les différences majeures entre les deux.

##### 1.3.4.1 IFC

L'IFC, pour Industry Foundation Class, est le format d'échange le plus important actuellement pour le BIM, selon Eastman et al. (2011), car c'est lui qui intègre la plus grande

partie des étapes du cycle de vie d'un bâtiment, de sa conception à son utilisation. C'est un format de fichier ouvert orienté objet. Il est développé et maintenu par buildingSMART, une alliance constituée de 16 chapitres regroupant des membres dans plusieurs pays (buildingSMART, 2014a). À ce jour, la version la plus récente est l'IFC4, publiée en mars 2013 (buildingSMART, 2014b).

Bien qu'il ait été développé à part entière de façon indépendante, l'IFC ressemble beaucoup dans son architecture au STEP, c'est-à-dire le STandard for the Exchange of Product model data. La similarité est due au fait que plusieurs personnes qui ont été impliquées dans le développement du STEP furent également impliquées lors de la création de l'IFC. De plus, les deux standards utilisent le même langage de modélisation, c'est-à-dire l'EXPRESS (Khemlani, 2004).

#### 1.3.4.1.1      Architecture

L'architecture de la version actuelle est divisée en quatre couches distinctes. Ce système à quatre couches a été implanté dans un but précis :

The layering system is designed in such a way that an entity at a given level can only be related to or reference an entity at the same level or at a lower level, but not an entity at a higher level. The modular design of the overall architecture is intended to make the model easier to maintain and grow, to allow lower-level entities to be reused in higher-level definitions, and to make a clearer distinction between the different AEC/FM<sup>1</sup> disciplinary entities so that the model can be more easily implemented in individual discipline-specific applications. (Khemlani, 2004)

Ainsi, il est logique que la couche de plus bas niveau soit la plus générale et que celle au plus haut niveau soit vraiment plus spécifique. Toujours selon Khemlani (2004), les quatre couches sont également divisées en de multiples catégories plus spécifiques, regroupant ensemble les entités qui sont relativement similaires ou qui ont trait au même domaine

---

<sup>1</sup> Architecture Engineering Construction / Facility Management

d'application. Voici donc une brève description, telle qu'expliquée par Khemlani (2004), pour chaque couche, soit la Resource Layer, la Core Layer, l'Interoperability Layer et la Domain Layer, la dernière étant de plus haut niveau :

- Resource Layer : Elle forme la base de tout le modèle, donc elle contient les entités les plus générales. Ces entités sont généralement réutilisées pour définir les autres entités de plus haut niveau.
- Core Layer : Elle contient des entités plus spécifiques, mais encore très générales et utilisées par celles de plus haut niveau. Elle contient surtout des concepts abstraits comme un espace, un site, etc.
- Interoperability Layer : Elle contient des entités vraiment spécifiques. En fait, ce sont surtout les entités qui seront utiles à plusieurs domaines d'application, donc qui risquent d'être utilisées par plusieurs personnes distinctes possiblement dans des compagnies différentes. On y retrouve notamment des éléments comme des murs, des portes, des poutres, colonnes, etc.
- Domain Layer : C'est la couche de plus haut niveau, elle contient finalement les entités très spécifiques à un domaine particulier, que ce soit l'architecture, l'ingénierie, etc. Elle contient donc des éléments plus spécifiques à ces domaines.

Les différentes catégories et couches du format IFC sont affichées sur la Figure 1.8.

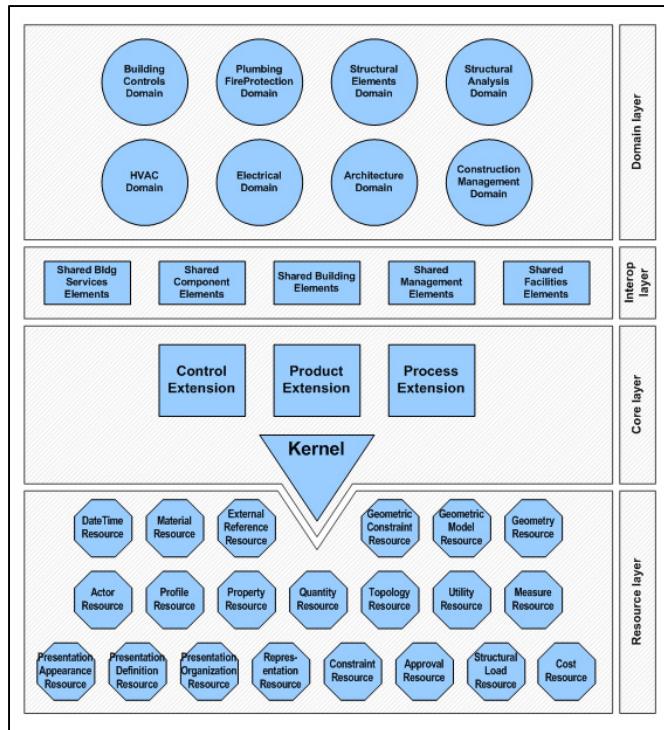


Figure 1.8 Architecture du modèle IFC  
Tiré de Liebich et al. (2013) avec autorisation

#### 1.3.4.1.2 Avantages et inconvénients

L'avantage principal de l'IFC reste que c'est le format de prédilection lorsqu'on parle de BIM. En effet, il est considéré comme étant le seul format de fichier d'interopérabilité pouvant couvrir entièrement le BIM :

The IFC is the only public, nonproprietary and well-developed data model for buildings and architecture existing today. [...] It is a de facto standard worldwide and is being formally adopted by different governments and agencies in various parts of the world. It is being picked up and used for a growing number of uses, in both the public and private sectors. (Eastman et al., 2011)

Ainsi, en travaillant avec ce format, les entreprises qui travaillent avec des logiciels de BIM ne devraient avoir aucun problème à exporter ces données, puisque le format est déjà très accepté dans le milieu et supporté par la majorité des logiciels de BIM.

Par contre, l'inconvénient qui risque de faire surface est le manque d'uniformité pour l'enregistrement des éléments structuraux qui seront nécessaires. En effet, de par son ouverture et l'organisation de son architecture, certains éléments peuvent être encodés de différentes façons dépendamment de quel logiciel a été utilisé pour créer le fichier : « There are no direct relationships between entities[...]; all relationships are indirectly defined, which allows entities to be combined and related in unique ways as required by the different applications that need to work with it. » (Khemlani, 2004) Ainsi, il faudra rester attentif aux logiciels créant les fichiers pour s'assurer que les liens utilisés seront reconnus par l'algorithme. Toutefois, cet inconvénient est minimisé par le fait que seule une petite partie des fichiers sera nécessaire, soit la géométrie des membres d'acier et leurs propriétés.

#### 1.3.4.2 CIS/2

Le format CIS/2, pour CIMsteel Integration Standards version 2, où CIMsteel représente Computer Integrated Manufacturing for Constructional Steelwork, est également un standard associé au BIM, mais est cependant plus spécifique à la charpente d'acier. Bien que le CIS de première version soit aussi ancien que l'IFC (1995), son intégration a été plus lente et plus difficile.

##### 1.3.4.2.1 Historique

La version originale du format a été développée, tel qu'indiqué par Khemlani (2005), dans le cadre d'un projet de dix ans nommé le Eureka CIMsteel Project qui s'est déroulé de 1988 à 1998. Ce projet impliquait 70 organisations différentes dans neuf pays européens.

Même si le projet s'est terminé en 1998, le format de deuxième version a tout de même vu le jour en 2000. En plus, l'American Institute of Steel Construction (AISC) cherchait dans ces années-là un moyen pour améliorer la compétitivité des fabricants d'acier américains et pour réduire les pertes de temps. Toujours selon Khemlani (2005), au lieu d'inventer un nouveau standard, ils ont décidé de reprendre le flambeau laissé par le CIS original et ont encouragé les développeurs de logiciels à créer des traducteurs pour le CIS/2.

C'est ainsi que par la suite s'est rapidement implanté le format CIS/2 auprès des fabricants d'acier américains. En effet, comme l'explique Khemlani (2005), ce format étant spécifique au domaine de l'acier structurel, il permet d'intégrer toutes les étapes de construction de l'ossature d'acier, de sa conception en ingénierie jusqu'à l'installation et le montage de toutes les pièces sur le chantier. Le format permet de gérer toutes les analyses et les planifications nécessaires au bon déroulement de la construction de la structure d'acier.

#### 1.3.4.2.2 Comparaison avec IFC

Bien qu'il soit différent de l'IFC, les deux formats partagent beaucoup de points communs. En effet, le CIS/2 est également très proche du STEP et est aussi écrit avec le langage EXPRESS. Le CIS/2 couvre cependant beaucoup plus d'éléments au niveau de l'acier structurel. On voit souvent le CIS/2 un peu comme le petit frère de l'IFC :

The CIS/2 standard captures all the information related to the design, analysis, procurement, fabrication planning, fabrication automation, and the erection of structural steel in buildings. In this respect, it can be seen as a subset of the larger, more ambitious IFC standard, which aims to cover the entire spectrum of tasks related to the design, construction, and operation of buildings. (Khemlani, 2005)

#### 1.3.4.2.3 Le futur du CIS/2

Puisqu'il n'est centré que sur le domaine de la structure d'acier, le format CIS/2 n'est pas suffisant pour répondre à tous les besoins du domaine de la construction. En effet, l'AISC et buildingSMART, visant tous deux à une meilleure interopérabilité, ont décidé sur le long terme d'intégrer les éléments du CIS/2 dans l'IFC. Cette intégration sera effectuée afin que l'IFC devienne un modèle comprenant tous les outils nécessaires autant pour le domaine de la construction que pour le domaine spécifique de la structure d'acier. La vision à long terme passe évidemment par le moyen et le court terme qui sont vus comme suit :

- Short term: Ensure model data can be exchanged as needed by the structural steel industry, regardless of the nature of the exchange or format used.

- Medium term: Promote IFC and make the format more accessible and understood by working with buildingSMART, other trade organizations, academia and subject experts.
- Long term: Facilitate the development and implementation of IFC to satisfy the needs of the structural steel industry. (Moor, 2011, p. 1)

D'ailleurs, la première étape a déjà débuté et est bien entamée étant donné qu'une page web sur le site du NIST (2012) fournit déjà tous les outils nécessaires à la conversion entre les deux formats. Ainsi, on voit déjà que le format CIS/2 est voué au long terme à disparaître, étant donné que le format IFC incorpore dans chacune de ses nouvelles versions de plus en plus d'éléments pour accommoder tous les domaines reliés à la construction.

### 1.3.5 Conclusion

Malgré que le CIS/2 soit un format ouvert dédié spécifiquement à la structure d'acier, l'IFC apparaît clairement comme le format de fichier à utiliser pour le développement d'un nouvel algorithme. Considérant que la version actuelle intègre déjà la majorité des éléments géométriques pouvant constituer une structure d'acier, le développement avec la version la plus actuellement répandue (IFC2x3) et la nouvelle version (IFC4) facilitera l'intégration future des nouvelles versions. De plus, les outils de conversion entre CIS/2, IFC et autres formats étant déjà disponibles grâce au NIST, l'adoption de l'IFC permet d'accepter automatiquement un vaste choix de formats.

## 1.4 La fabrication additive

La fabrication additive est la technologie utilisée dans ce projet pour créer un ensemble de modèles de membres de charpente à échelle réduite. Ainsi, afin d'effectuer un choix éclairé parmi les différentes technologies existantes, quelques ouvrages pertinents ont été consultés.

### 1.4.1 Littérature

Wohlers (2012) présente dans son rapport une revue de l'état de l'industrie de la fabrication additive et il explique, discute et classe les différentes technologies et matériaux disponibles au temps de la rédaction. Il discute aussi du futur de la technologie.

Gibson, Rosen et Stucker (2010) présentent dans leur ouvrage plusieurs sujets ayant trait à la fabrication additive. Ils expliquent les technologies et les applications qui en découlent ou qui sont encore perçues comme inhabituelles. Le premier chapitre, introduisant les principes de base de la fabrication additive, ainsi que le résumé de chacun des chapitres discutant des différentes technologies sont ceux qui furent les plus intéressants pour ce projet.

### 1.4.2 Définition

La fabrication additive consiste en la création d'objets par ajout de matière. Contrairement à l'usinage, où on découpe une pièce brute afin d'obtenir une pièce finale plus petite, la fabrication additive consiste à ajouter, peu à peu, de la matière afin de former un objet à partir d'un modèle informatique. Puisque l'opération s'effectue généralement couche par couche, on fait souvent référence à ce procédé comme étant de l'impression 3D :

The ASTM International Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies defines additive manufacturing as the process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing technologies. (Wohlers, 2012, p. 13)

D'ailleurs, l'appellation « prototypage rapide » utilisée pour faire référence à cette technologie commence à être critiquée dans le sens qu'avec les nouvelles technologies, on crée de plus en plus de produits finaux :

Users of [rapid prototyping] technology have come to realize that this term is inadequate and does not effectively describe more recent applications of the technology. [...] Many parts are in fact now directly manufactured in these machines; so it is not possible for us to label them as “prototypes.” The term

Rapid Prototyping also overlooks the basic principle of these technologies in that they all fabricate parts using an additive approach. A recently formed Technical Committee within ASTM International agreed that new terminology should be adopted. While this is still under debate, recently adopted ASTM consensus standards now use the term Additive Manufacturing. (Gibson, Rosen et Stucker, 2010, sect. 1.1)

Ainsi, tel que décrit, bien que le choix d'un meilleur terme soit encore objet de débat, le terme « Additive Manufacturing », ou fabrication additive, est utilisé dans certains standards de l'ASTM, et sera principalement utilisé pour décrire cette technologie pour le reste du présent mémoire. Le terme « impression 3D » ou sa conjugaison sera également employé.

### 1.4.3 Matériaux

Plusieurs matériaux sont désormais disponibles pour la fabrication additive. En effet, on retrouve désormais plusieurs types de plastiques, plusieurs types de métaux, la céramique, le verre et encore plusieurs types de matériaux composites. Ainsi, ce n'est pas le choix qui manque quant aux matériaux, le critère décisif étant plutôt le coût de fabrication.

### 1.4.4 Méthodes existantes

Voici un aperçu décrivant les principales méthodes de fabrication additive existantes. Les termes anglais ont été conservés entre parenthèses car ce sont les termes adoptés par l'ASTM International Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies. Afin d'éviter de le répéter pour chaque méthode, sauf si c'est autrement mentionné, on procède généralement couche par couche pour l'ajout de matériel. Les méthodes suivantes sont celles telles que décrites par Wohlers (2012, p. 68). Les traductions anglais-français sont tirées de Thériault (2014)

#### 1.4.4.1 Extrusion de matériau (*Material extrusion*)

La méthode « Extrusion de matériau » consiste à faire fondre un matériau et à le déposer, par le biais d'un orifice restrictif, aux endroits où l'ajout de matériel est nécessaire.

Généralement sous forme de filament, le matériau se joint et fusionne avec les parties déjà créées.

#### **1.4.4.2 Projection de matériau (*Material jetting*)**

La méthode « Projection de matériau » utilise des têtes d'impression similaires à celles utilisées dans les imprimantes à jet d'encre afin de déposer de fines gouttes de matériau aux endroits voulus. Les gouttes se solidifient alors pour fusionner avec le matériau déjà présent afin de former l'objet. Cette méthode a pour avantage de pouvoir utiliser simultanément plusieurs matériaux, formant ainsi des objets plus complexes ou colorés.

#### **1.4.4.3 Projection de liant (*Binder jetting*)**

Similaire à la méthode précédente, la méthode « Projection de liant » utilise la même technologie mais cette fois pour déposer de fines gouttes d'agent liant sur un lit de poudre. À chaque couche, on doit donc ajouter une fine épaisseur de poudre.

#### **1.4.4.4 Stratification de matériau en feuille (*Sheet lamination*)**

La méthode « Stratification de matériau en feuille » consiste à découper plusieurs feuilles minces pour ensuite les lier ensemble afin de former un objet. Ainsi, on peut utiliser des matériaux simples comme du papier ou du plastique, mais également des matériaux plus complexes comme des types de métaux.

#### **1.4.4.5 Photopolymérisation en cuve (*Vat photopolymerization*)**

La méthode « Photopolymérisation en cuve », parfois également appelée lithographie, est l'une des plus anciennes. Elle consiste à polymériser un liquide qui est sensible et qui réagit à la lumière. Cela a pour effet de le durcir ou de le rendre solide, permettant ainsi de créer plusieurs couches d'un objet.

#### 1.4.4.6 Fusion sur lit de poudre (*Powder bed fusion*)

La méthode « Fusion sur lit de poudre » consiste à étaler une fine couche de poudre pour ensuite faire fusionner les parties voulues en utilisant une source d'énergie thermique, tel que des lasers, faisceaux d'électrons ou lampes infrarouges.

#### 1.4.4.7 Dépôt de matériau et fusion (*Directed energy deposition*)

La méthode « Dépôt de matériau et fusion » est très similaire à la méthode précédente, sauf qu'au lieu de fusionner les parties voulues solides sur une succession de fines couches de poudre, on va directement déposer le matériau à fusionner à l'endroit voulu. Ainsi, cette méthode est l'une des seules qui n'a pas nécessairement besoin de procéder couche par couche et qui permet également de pouvoir réparer ou modifier des pièces réalisées antérieurement.

### 1.4.5 Modélisation

Avant de pouvoir créer un objet à l'aide de la fabrication additive, l'objet doit avoir été conçu et modélisé. Un point très positif pour cette technologie est que toutes, ou sinon la très grande majorité des techniques de fabrication, utilisent un modèle numérique de format STL, pour STereoLithography ou pour « Standard Tessellation Language », dépendant des auteurs. Ce type de modèle fournit les surfaces limites du solide par une succession de polygones, les plus simples étant évidemment des triangles. Ainsi, la surface formée par tous les polygones aura un côté solide, l'autre côté étant le vide. En général, les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) ont un outil permettant de convertir un fichier dans ce format. Il existe également plusieurs logiciels permettant de réparer les modèles comportant encore des ouvertures, ou de les préparer juste avant leur utilisation dans la machine de fabrication additive.

#### 1.4.6 Conclusion

Malgré le vaste choix de technologies disponibles, finalement, le choix se fera probablement plus en considérant le coût de fabrication et son rapport avec la qualité des produits fabriqués. Bien qu'il soit probablement possible de trouver une méthode capable de produire des modèles réduits dans un métal quelconque, les solutions moins dispendieuses comme le « material extrusion » seront probablement la solution pour fabriquer nos modèles réduits. Les propriétés recherchées dans la méthode à choisir seront surtout la solidité des membres fabriqués et la précision d'impression. La solidité permet d'assurer qu'ils puissent être transportés et manipulés facilement sans grand risque de cassure. La précision permettra quant à elle d'assurer que les modèles réduits représentent bien le modèle numérique et qu'ainsi le parallèle entre les deux puisse être fait. La dernière propriété recherchée sera évidemment le faible coût de fabrication, afin qu'on puisse créer un lot de nombreuses pièces différentes tout en respectant un budget de 2 000 \$ pour la fabrication.

### 1.5 Les algorithmes de chargement

Les problèmes de chargement, qui incluent également les problèmes de découpe de matière première en différentes pièces, sont un sujet faisant l'objet de recherches depuis plusieurs décennies. C'est pourquoi, tant en deux qu'en trois dimensions, plusieurs centaines d'articles de recherche ont été publiés sur le sujet. Malgré cette quantité importante, le nombre d'articles retenu a été limité aux quatre plus importants pour le projet. Parmi ces quatre articles, il y a d'abord deux typologies permettant de classer le problème actuel afin de plus facilement identifier les articles traitant de problèmes similaires. Le troisième article est un état de l'art analysant les contraintes auxquelles répondent les articles publiés dans les trois dernières décennies. Le dernier article est celui dont le problème se rapproche le plus du présent projet. Ainsi, pour cette section, en plus de décrire les ouvrages retenus, une analyse sera effectuée afin de voir où se situe le problème traité dans ce projet par rapport aux autres. De plus, nous tenterons de voir si la littérature propose des solutions qui pourraient être appliquées à ce problème ou adaptées afin d'y répondre.

### 1.5.1 Typologie de Dyckhoff (1990)

Dyckhoff (1990) a élaboré une première typologie des problèmes de découpe et d'empaquetage (cutting & packing problems) afin d'être en mesure de mieux les identifier dans la littérature et afin que les auteurs puissent communiquer et comparer plus aisément leurs travaux. Il a décidé de séparer les problèmes selon quatre critères, soit la dimensionnalité, le type d'assignement, l'assortiment des grands objets et l'assortiment des petits items. Avec ces quatre critères, 96 types peuvent ainsi être distingués. Étant donné que cette typologie a ensuite été reprise et améliorée par Wäscher et al. (2007), nous nous concentrerons principalement sur cette dernière.

### 1.5.2 Typologie de Wäscher et al (2007)

Wäscher, Haußner et Schumann (2007), voyant la multiplication et la complexification des problèmes de découpe et d'empaquetage ainsi que quelques lacunes à la typologie de Dyckhoff, ont décidé de publier une nouvelle typologie plus moderne. Ils ont principalement repris les idées de Dyckhoff mais les ont mieux adaptés à la langue anglaise et aux nouvelles réalités. Afin de séparer les problèmes selon différentes catégories, ils utilisent cinq critères, soit la dimensionnalité, le type d'affectation, l'assortiment des items, l'assortiment des contenants et la forme des items.

En considérant seulement le type d'affectation, il y a deux situations générales de problèmes d'empaquetages, soit la maximisation en (valeur de) sortie et la minimisation en (valeur d') entrée, soit respectivement « output (value) maximisation » et « input (value) minimisation » selon les auteurs (traduction française libre). La première situation fait référence aux problèmes où, pour un ensemble donné de pièces et de contenants, on tente de minimiser le nombre de contenants nécessaires pouvant contenir toutes les pièces : « A given set of small items is to be assigned to a set of large objects. [...] [T]he set of large objects is sufficient to accommodate all small items. All small items are to be assigned to a selection (a subset) of the large object(s) of minimal “value”. » (Wäscher, Haußner et Schumann, 2007, pp. 1114-

1115) Noter que les auteurs généralisent un contenant comme étant un « large object » et un item comme étant un « small item ».

La deuxième situation s'applique dans le cas où le nombre de contenants est limité, et qu'ainsi il faut maximiser le nombre ou la valeur des pièces qui y seront insérées, sachant qu'on ne pourra pas toutes les placer : « [A] set of small items has to be assigned to a given set of large objects. The set of large objects is not sufficient to accommodate all the small items. All large objects are to be used [...] to which a selection (a subset) of the small items of maximal value has to be assigned. » (Wäscher, Haußner et Schumann, 2007, p. 1114)

Les auteurs distinguent par la suite ces deux situations générales en ce qu'ils appellent des catégories basiques, intermédiaires et raffinées selon le nombre de critères pris en compte. Les catégories basiques prennent en compte le type d'affectation ainsi que l'assortiment des items. Les catégories intermédiaires ajoutent à celles basiques le critère d'assortiment des contenants. Finalement, les catégories raffinées prennent en compte tous les cinq critères.

Selon la perspective, le projet actuel pourrait être classé dans l'une ou l'autre des deux situations générales, dans deux catégories basiques et dans plusieurs catégories intermédiaires et raffinées. En effet, si on prend une vue globale sur toutes les pièces à produire et à livrer pour un bâtiment, sachant d'avance qu'on dispose d'une flotte de semi-remorques donnée, on tentera alors de minimiser le nombre de véhicules nécessaires pour transporter tout l'acier du bâtiment. Cette perspective fait donc référence à la situation de minimisation des entrées. Le choix du nombre de véhicules se produirait ainsi pendant la planification de la production, à partir du modèle virtuel, et pourrait même orienter l'ordre de production des pièces pour correspondre à l'ordre d'empaquetage suggéré, tout en suivant globalement l'ordre de livraison au chantier, qui est également important. Selon cette perspective, sachant que les pièces sont généralement très hétérogènes, dans le sens qu'elles sont différentes l'une de l'autre et qu'il y a peu de pièces identiques, le problème appartient à la catégorie basique « Bin Packing Problem ». Il peut cependant appartenir à deux catégories intermédiaires, soit la catégorie « Single Bin Size Bin Packing Problem (SBSBPP) » si tous les véhicules sont identiques, ou la catégorie « Multiple Bin Size Bin Packing Problem »

(MBSBPP) » si les véhicules comportent quelques différences de formes, de dimensions ou de limites de poids.

Or, si on prend une vue moins globale, le projet actuel pourrait être classé dans l'autre situation, soit celle de maximisation des sorties. En effet, on pourrait faire face au choix de déterminer, pour chaque véhicule (ou ensemble de véhicules) qui est disponible, quelles membres sont à charger selon leur nécessité sur le chantier parmi ceux qui ont déjà été produits. Ainsi, on tente de maximiser la quantité ou la valeur des membres à charger sur une semi-remorque, sachant qu'on ne pourra pas tous les envoyer immédiatement. Ainsi, selon cette perspective, le problème appartient à la catégorie basique « Knapsack problem ». Il existe par la suite trois catégories intermédiaires auxquelles pourrait appartenir le problème. Dans le cas où un seul véhicule est disponible, il s'agit du « Single Knapsack Problem (SKP) », alors que s'il y a plusieurs véhicules, il peut s'agir du « Multiple Identical Knapsack Problem (MIKP) » ou du « Multiple Heterogeneous Knapsack Problem (MHKP) » selon que les remorques soient identiques ou non.

Ces différentes catégories intermédiaires pourraient toutes ensuite être séparées en différentes catégories raffinées selon la dimensionnalité et la forme des pièces. Le problème se situe en trois dimensions, donc il est de dimensionnalité trois, et la forme des pièces est irrégulière, c'est-à-dire que les pièces ne sont pas de formes régulières comme des prismes rectangulaires ou des sphères. Ainsi, nous avons cinq catégories raffinées auxquelles pourrait appartenir le problème selon la formule de Wäscher, Haußner et Schumann (2007, p. 1120) :

- 3-dimensional irregular SBSBPP;
- 3-dimensional irregular MBSBPP;
- 3-dimensional irregular SKP;
- 3-dimensional irregular MIKP;
- 3-dimensional irregular MHKP.

Il faut cependant noter que, peu importe la catégorie, le problème actuel comporte certaines caractéristiques qui font que le type de problème abordé est considéré comme un « problem (type) variant », c'est-à-dire un type de problème qui ne respecte pas certaines hypothèses posées par Wäscher, Haußner et Schumann (2007, p. 1113). Par exemple, les membres à positionner sur une semi-remorque ne seront pas nécessairement uniformément distribués selon le type, ce qui positionne le problème comme une variante : « A problem with strongly varying demands [...] will be considered as a variant, here. » (Wäscher, Haußner et Schumann, 2007, p. 1116) Un autre aspect, soit la forme des membres à placer, peut être considéré comme une variante : « Problems which allow for non-orthogonal layouts and/or mixes of regular and irregular small items will be looked upon as problem variants again. » (Wäscher, Haußner et Schumann, 2007, p. 1116) Les membres à placer sur les semi-remorques peuvent parfois comporter plusieurs membres similaires groupés et placés d'avance de façon à avoir des formes plus régulières. Il peut aussi y avoir parfois des boîtes ou des palettes de matériaux à insérer au travers des membres. Les éléments à charger peuvent donc parfois comporter un mélange de formes régulières et irrégulières.

### 1.5.3 État de l'art de Bortfeldt et Wäscher (2013)

Bortfeldt et Wäscher (2013) ont effectué un état de l'art sur le chargement de conteneurs dans lequel ils inventoriaient les publications des dernières années, soit de 1980 à 2011, qu'ils classaient selon la typologie de Wäscher, Haußner et Schumann (2007) et comparent selon les contraintes auxquelles elles répondent. Ces dernières sont divisées selon qu'elles concernent les conteneurs, les items individuels, les groupes d'items, le positionnement ou encore le chargement complet :

We will distinguish between constraints related to the large objects (container-related constraints) and those related to the small items, where the latter ones may refer to an individual item (item-related constraint) or the entire set or a subset of items (cargo-related constraints). Furthermore, constraints can be related to the relationship between the large objects and the small items. They manifest in positioning constraints of the small items within the containers. Finally, constraints may be related to the result of the packing process, i.e. to the load (load-related constraint). (Bortfeldt et Wäscher, 2013, p. 3)

Ainsi, parmi ces cinq catégories, ils identifient dix contraintes que les méthodes développées dans la littérature gèrent ou non. Afin de bien se positionner par rapport à la littérature, voici pour chaque contrainte qu'ils ont identifié une brève explication ainsi qu'une justification à savoir si le problème actuel devra s'y attaquer ou non. Les titres de la section 1.5.3.1 à 1.5.3.5, incluant les sous-titres, sont tous des traductions libres de ceux retrouvés dans la section 4 de leur article.

### **1.5.3.1 Contraintes reliées au conteneur**

#### **1.5.3.1.1 Limites de masse**

Les limites de masse (weight limits) imposent évidemment de ne pas excéder une certaine masse dans le contenant avec les items. Les véhicules utilisés pour le transport de l'acier comportent chacun une limite spécifique de masse selon le nombre d'essieux, la masse de la semi-remorque allège et la masse du tracteur. Par exemple, la masse totale maximale d'un tracteur semi-remorque à six essieux (trois pour le tracteur, trois pour la semi-remorque) est de 46 600 kg selon l'accord canadien (Schulman, 2003). Ainsi, en soustrayant la masse du tracteur et de la semi-remorque allège, on peut obtenir la masse maximale du chargement. Évidemment, les éléments composant le tracteur semi-remorque doivent tous être conçus pour pouvoir supporter cette masse. Dans tous les cas, la plus petite masse entre le poids nominal brut du véhicule (PNBV) et la limite imposée par les règlements routiers sera celle qui sera utilisée comme valeur maximale. La masse sera donc un facteur à vérifier pour chaque chargement dans le cadre du projet.

##### **1.5.3.1.1.1 Distribution de la masse**

La contrainte de distribution de la masse (weight distribution constraint) sert à rendre les chargements plus stables en répartissant la masse des items le plus également possible partout sur la surface. Sur les semi-remorques, cette contrainte est surtout présente au niveau de la répartition sur la largeur. Afin de respecter cette contrainte, « one may demand that the

center of gravity of the load is close to the geometrical mid-point of the container floor [...] or should not exceed a certain distance. » (Bortfeldt et Wäscher, 2013, p. 4)

Afin que les véhicules ne versent pas pendant le transport, il sera nécessaire de respecter cette contrainte, surtout en centrant le plus possible le centre de gravité du centre de la largeur de la semi-remorque. De plus, plus le centre de gravité est bas, plus le chargement sera stable, donc en général les pièces les plus lourdes devront être sous les pièces les plus légères.

### 1.5.3.2 Contraintes reliées aux items individuels

#### 1.5.3.2.1 Priorités de chargement

Comme les auteurs l'expliquent, les contraintes définissant une priorité de chargement (loading priorities) ne peut survenir que dans la situation d'une maximisation de sortie, soit quand on doit maximiser la quantité ou la valeur des items dans un nombre limité de contenants. On devra parfois prioriser les pièces, dans le sens où certaines pièces sont plus importantes à charger ou doivent absolument l'être dans un voyage donné, alors que d'autres ne peuvent être chargées que par la suite, s'il reste de la place. Les items peuvent appartenir à différentes classes de priorités « in which no item of a lower priority should be shipped if it requires an item of a higher priority to be left behind. » (Bortfeldt et Wäscher, 2013, p. 4)

Dans le cas du chargement des membres d'acier, les différents acteurs de l'industrie ont l'habitude de séparer les bâtiments en différentes « séquences » représentant un ordre logique pour construire le bâtiment. Par exemple, un bâtiment à deux étages pourrait être séparé en deux séquences, une par étage. Donc, il est possible que cette contrainte doive être considérée dans la mesure où on parle d'ensembles de pièces.

#### 1.5.3.2.2 Orientation des items

Les contraintes d'orientation (orientation constraints) servent généralement à limiter le nombre d'orientations qu'un item pourra prendre afin de simplifier le problème. Dans le

monde réel, on les associe également au fait que certains items doivent parfois être orientés dans un sens défini par ses propriétés physiques, par exemple parce qu'il est plus solide dans une direction et risque de briser dans l'autre. Ainsi, dans la littérature la plupart des problèmes étant orthogonaux, le nombre maximal d'orientations est généralement de six, soit les six faces de la boîte. Tous ne gèrent pas cette contrainte de la même façon, puisque parfois on limite le nombre d'orientations possibles, parfois on fixe l'objet dans son orientation originale. Dans le cas des problèmes non-orthogonaux, il faut généralement tout de même fixer un nombre maximal d'orientations possible afin de réduire l'étendue du calcul à effectuer.

Dans le cas du chargement des membres d'acier, leur orientation joue un rôle important afin de conserver la stabilité des membres tout au long de leur chargement. En général les membres sont « couchés », c'est-à-dire que leur dimension la plus grande est placée à l'horizontale, dans le même axe que la semi-remorque, puisque de toute façon une bonne partie des pièces sont plus longues que la largeur de la semi-remorque. Par contre, certains membres peuvent également être orientés dans le sens de la largeur, et d'autres pourraient même être « debout » s'ils comportent un élément pouvant les rendre stable dans cette position. Ainsi, il faudra considérer que les membres puissent être tournés, par contre selon leurs dimensions et leur forme le nombre d'orientations possible sera limité.

#### 1.5.3.2.3 Empilement des items

Tous les items qui doivent être chargés ne peuvent pas nécessairement supporter le poids engendré par d'autres items empilés au-dessus (stacking constraint). Plusieurs caractéristiques influencent donc cette contrainte, notamment le matériau utilisé pour emballer le produit, la résistance du produit lui-même, sa forme, etc. Il est donc important de considérer cette contrainte lorsque certains items risquent d'être plus fragiles que d'autres.

Dans le projet qui nous intéresse, les items sont des membres d'acier qui sont, en très grande majorité, très solides. Il n'y a donc pas de contrainte d'empilement pour la majorité des

membres. Par contre certains morceaux de structure, comme les escaliers, les échelles à crinoline ou les garde-fous par exemple, qui sont chargés parfois avec des poutres ou des colonnes, sont plus fragiles et ne pourront pas supporter le poids des membres plus massifs. Il faudra donc pouvoir considérer cette contrainte, probablement de façon binaire pour chaque pièce, où soit elle peut supporter une charge, soit elle ne peut pas.

### 1.5.3.3 Constraintes reliées aux groupes d'items

#### 1.5.3.3.1 Chargement complet

La contrainte de chargement complet (complete-shipment constraints) fait référence aux produits qui peuvent être emballés dans plusieurs paquets différents, mais qui nécessitent de rester ensemble. Par exemple, certains meubles qui requièrent d'être assemblés. Dans ces cas, surtout si les contenants vont à plusieurs destinations et qu'il s'agit d'un problème de maximisation de sortie, c'est-à-dire que le nombre de contenants est limité, alors il ne faut pas que les différentes parties d'un même produit soient séparées dans plusieurs convois.

Cette contrainte pourrait faire également référence aux « séquences » utilisées dans l'industrie des fabricants d'acier. Par contre, puisque selon nos partenaires, tous les véhicules ne transportent l'acier que pour un seul chantier, les séquences seront plutôt considérées comme des priorités de chargement (tel que mentionné plus haut).

#### 1.5.3.3.2 Allocation

Les contraintes d'allocation (allocation constraints) comportent deux situations générales d'application. Dans les deux cas, il s'agit de problèmes à plusieurs conteneurs. Le premier cas est lorsqu'un conteneur a plusieurs destinations et qu'on désire qu'un sous-ensemble allant à la même destination soit sur le même véhicule. Le second cas est lorsqu'on doit faire attention de ne pas combiner certains items lorsque certains autres items se trouvent dans un contenant. Par exemple, il ne faut pas combiner de la nourriture avec des produits toxiques,

pour éviter le risque de contamination, un peu comme on le fait avec les sacs d'épicerie, où on place normalement les produits de nettoyage dans un sac séparé des aliments comestibles.

Ces deux cas sont des situations qui ne sont pas applicables dans le cadre du projet actuel étant donné que les véhicules n'ont généralement qu'une seule destination et que les items n'ont pas de restrictions spéciales. Des exceptions existent, comme par exemple le cas où un chantier est tellement grand qu'il peut comporter plusieurs zones de déchargement, cependant une simplification raisonnable du problème pourrait omettre cette situation, au moins en première approche.

#### **1.5.3.4 Contraintes reliées au positionnement**

Les contraintes de positionnement peuvent exiger un positionnement absolu ou relatif. Dans le cas d'une contrainte de positionnement absolu, on devra positionner un item à un endroit défini par rapport au contenant. On peut retrouver cette contrainte dans des situations où le contenant a une forme irrégulière. Par exemple, un contenant dont le coin avant est en angle afin d'être plus aérodynamique ne pourra pas à cet endroit recevoir des items d'une certaine hauteur. Dans le second cas, celui de contraintes relatives, le positionnement des items doit être fait par rapport à d'autres items. Il peut autant s'agir de contraintes imposant que des items soient côte à côte ou qu'ils soient autant éloignés que possible.

Ce type de contraintes ne devrait pas se retrouver dans le projet actuel, sauf peut-être sous la forme d'une règle tentant d'imposer le plus possible que les membres les plus lourds soient placés sous les plus légers. Ainsi, le centre de gravité est plus bas, ce qui est important pour la stabilité du véhicule, et les membres ne risquent pas de se déformer sous le poids de ceux plus imposants.

### **1.5.3.5 Constraintes reliées au chargement**

#### **1.5.3.5.1 Stabilité**

La stabilité d'un chargement, selon Bortfeldt et Wäscher (2013), peut être divisée en deux catégories spécifiques : La stabilité verticale et la stabilité horizontale. La première fait référence à la stabilité nécessaire pour que les items ne tombent pas au sol, par gravité, principalement lorsque le chargement est dans une situation statique. L'autre, la stabilité horizontale, est plutôt la stabilité nécessaire afin que le chargement ne bouge pas sur le véhicule pendant que ce dernier est en mouvement. Ainsi, il s'agit plutôt d'empêcher les items dans le chargement de bouger horizontalement lorsque, par exemple, le véhicule tourne, accélère ou décélère. Les auteurs mentionnent que ce type de stabilité est généralement atteint lorsque les items sont collés les uns aux autres ou encore aux murs du conteneur. Bortfeldt et Wäscher (2013) mentionnent également que la stabilité est l'une des contraintes les plus importantes observées dans la littérature, avec l'occupation de l'espace du conteneur. Ils mentionnent également que la stabilité est souvent atteinte à l'aide de matériaux stabilisateurs, comme de la styromousse.

Dans la situation qui nous intéresse, la stabilité occupe également un rôle important, puisqu'elle doit être maintenue tout au long de la préparation du chargement et lorsqu'il est terminé. La stabilité verticale est principalement assurée par l'utilisation de cales de bois, alors que la stabilité horizontale doit être assurée grâce aux sangles ou chaînes qui attachent le chargement, les semi-remorques plateau ne disposant pas de murs.

#### **1.5.3.5.2 Complexité**

Bortfeldt et Wäscher (2013) identifient plusieurs situations dans différents articles qui complexifient le patron de chargement final. Par exemple, selon eux, la contrainte de complexité la plus fréquemment considérée est celle de découpe par guillotine :

The most frequently considered complexity constraint is the guillotine cutting constraint that is viewed here from a loading perspective. A guillotine pattern [...] represents a type of loading pattern which can be described and packed easily. A loading pattern is said to be guillotineable, if it can be obtained by a series of “cuts” in parallel to the container faces. (Bortfeldt et Wäscher, 2013, p. 8)

Le présent projet comporte une caractéristique qui pourrait être vue comme une contrainte de complexité. Il s'agit du fait que le chargement doit pouvoir être chargé par le haut, par exemple par un pont roulant, membre par membre. Ainsi, chaque membre doit être placé soit sur le dessus ou à côté d'un membre déjà placé. On ne peut pas, par exemple, aller placer un membre sous d'autres membres par les côtés, puisque d'abord les membres supérieurs ne seraient pas supportés, et ensuite parce que la chaîne qui tient le membre à placer doit pouvoir passer.

Ainsi, parmi les dix contraintes identifiées par Bortfeldt et Wäscher (2013), cinq doivent absolument être considérées dans le présent projet, soit les limites de masse, la distribution de la masse, l'orientation des items, la stabilité et la complexité. Trois contraintes devraient également être considérées, sans être toujours nécessaires, selon la façon dont le problème est abordé, soit les priorités de chargement, l'empilement des items et le positionnement des items. Finalement, seulement deux contraintes ne s'appliquent pas au présent projet, soit la contrainte de chargement complet et d'allocation.

Bortfeldt et Wäscher (2013) concluent leur article en mentionnant que la recherche sur le chargement de conteneurs « has been dealing with standard problems in the first place while issues relevant to container loading in practice have often been neglected. » (Bortfeldt et Wäscher, 2013, p. 11). Ils émettent ensuite une série de points résumés exprimant leurs déductions, dont notamment :

- Container loading problems in practice are often characterized by the fact that several constraints have to be dealt with simultaneously. The literature addressing this issue is scarce, though.

- Also from a more theoretical point of view, the state-of-the-art in the area of container loading is not convincing. Modeling approaches to the various problem types are few. In particular with respect to the inclusion of practically-relevant constraints, research still has to be looked upon as being in its infancy. (Bortfeldt et Wäscher, 2013, p. 12)

On en déduit que bien qu'une multitude d'articles s'attaquent à des problèmes de chargement, les situations réelles, telle que celle considérée dans le présent projet, sont rarement abordées. Les articles considèrent plutôt des problèmes plus standards ou théoriques avec des contraintes limitées, donc des versions plus simples des problèmes réels.

#### 1.5.4 Article de Egeblad et al. (2010)

Bien que Bortfeldt et Wäscher aient considéré dans leur revue plus de 160 articles, seulement trois s'attaquent à des pièces aux formes irrégulières en trois dimensions. D'ailleurs, ce sont trois articles du même auteur principal, Jens Egeblad. L'un de ces articles, selon le commentaire que donnent Bortfeldt et Wäscher, se démarque particulièrement :

[T]he paper by Egeblad et al. (2010) is particularly remarkable. The authors deal with a container loading problem of the SKP type arising at a furniture manufacturing company. The cargo to be loaded consists of a mixture of regular and irregular items requiring specific stacking and orientation constraints to be satisfied. (Bortfeldt et Wäscher, 2013, p. 9)

En effet, Egeblad et al. (2010) parviennent à créer un algorithme heuristique permettant de charger notamment des divans et des causeuses de façon à maximiser l'espace utilisé tout en respectant plusieurs contraintes liées à la fragilité des pièces. Ils incluent ensuite des boîtes de formes régulières dans le chargement afin d'utiliser l'espace restant. Pour ce faire, ils ont séparé les items en trois catégories, soit les petits et les moyens items qui sont des boîtes, et les grands qui sont les meubles.

Leur algorithme heuristique est séparé en sept étapes, soit le « preprocessing », le « quad-wall building », le « local search », la « stability », le « greedy algorithm », le « wall-

building » et finalement une répétition du « greedy algorithm ». (Egeblad et al., 2010, p. 882) Les quatres premières étapes s'attaquent aux grands items, soit les meubles de salon, alors que les trois dernières s'attaquent aux items moyens et petits. La Figure 1.9 illustre ces étapes de la gauche vers la droite en précisant à quels types d'items et quelle représentation numérique est utilisée pour chaque étape.

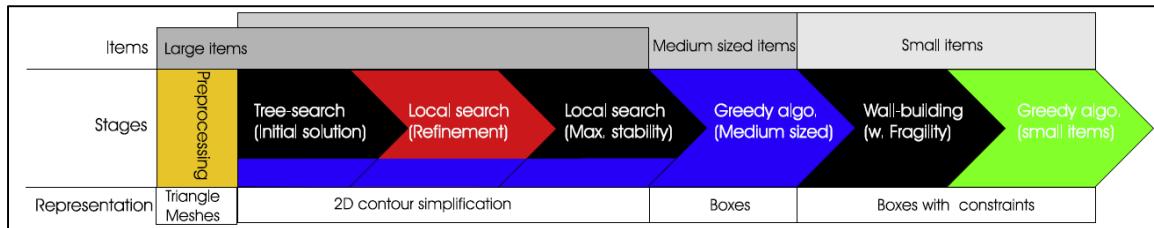


Figure 1.9 Étapes de la solution  
Tirée de Egeblad et al. (2010, p. 883) avec permission

La partie de cet article la plus intéressante est celle qui traite les grands items, les meubles de salons, qui sont de formes irrégulières. Particulièrement, l'étape du « preprocessing » inclus une analyse de la géométrie des items pour pouvoir créer un très grand ensemble de ce que les auteurs appellent des « templates », soit des groupements de quelques pièces, stables physiquement, parmi lesquels les étapes subséquentes de l'algorithme viennent choisir. Donc, au lieu de placer les pièces une à une, ces étapes tentent plutôt de placer les templates, ce qui simplifie la gestion des formes irrégulières et la gestion de la stabilité. Une partie de cette idée pourrait être modifiée et adaptée pour inspirer les premières étapes d'un algorithme de chargement de membres d'acier.

## CHAPITRE 2

### MÉTHODOLOGIE

Maintenant que les concepts des cinq thèmes principaux de ce mémoire ont été expliqués dans la revue de littérature, une démarche doit être établie pour cerner et documenter la situation actuelle dans l'industrie afin d'expliquer les connaissances, ce qui correspond au second objectif spécifique. La manière de travailler des préposés au chargement chez les fabricants d'acier constitue l'élément principal à documenter. La première idée, et la plus intuitive, a donc été d'aller observer les travailleurs au sein de différentes entreprises afin de relever les points communs et les différences. Puis, considérant la difficulté à documenter le travail qu'ils réalisent sans avoir accès à certaines informations, telles que les modèles virtuels des membres chargés, l'idée de passer les préposés en entrevue a semblé la plus appropriée. En disposant d'un ensemble de membres en modèles réduits, on peut alors demander aux préposés de les placer sur une semi-remorque miniature comme s'il s'agissait de membres réels.

Ainsi, nous avons décidé de visiter d'abord quelques entreprises afin de voir comment se déroule le travail normalement. Ces visites ont guidé la préparation des entrevues et les questions à poser. La section 2.1 présentera donc le résumé des éléments observés chez quatre entreprises visitées, alors que la section 2.2 expliquera le cheminement d'idées qui a mené au concept des entrevues réalisées. La méthode de fabrication des modèles réduits est décrite au Chapitre 3, alors que le protocole pour la collecte des données lors des entrevues est expliqué au Chapitre 4.

#### 2.1 Visites d'entreprises

Quatre entreprises de fabrication d'acier ont été visitées, avec une attention particulière à leurs zones de chargement de l'acier sur semi-remorques. Deux de ces visites ont été plutôt brèves alors que nous avons observé le chargement d'acier pendant au moins une journée pour les deux autres. Cette section présentera donc brièvement le fonctionnement du

chargement d'acier chez ces quatre entreprises, chacune procédant un peu différemment des autres. Les entreprises ne seront toutefois pas nommées.

### 2.1.1    **Entreprise A**

La première entreprise est également la plus grande de celles visitées. Nous y avons fait de l'observation pendant trois jours non consécutifs. La zone de chargement est principalement située à l'extérieur, avec une structure comportant plusieurs ponts roulants, tel qu'illustré à la Figure 2.1. Ils peuvent charger plusieurs semi-remorques simultanément et disposent d'une vaste zone d'entreposage extérieure. Cette entreprise charge directement sur les semi-remorques qui effectueront la livraison.



Figure 2.1 Zone de chargement de l'entreprise A

Le processus de chargement débute à la zone de peinture, où les pièces sont soit peinturées, soit simplement apprêtées. À ce moment, elles sont placées sur des paniers d'acier empilables qui permettent de transporter plusieurs pièces du même coup. Donc, de la zone de peinture à la zone de chargement, une pile de paniers comportant, selon leur grandeur, quelques dizaines de pièces, est transportée. Une fois à la zone de chargement, les paniers sont dépilés et étalés afin que toutes les pièces soient accessibles au pont roulant et visibles depuis la semi-remorque plateforme. En se plaçant sur la semi-remorque, les préposés peuvent alors planifier leur logique de chargement en observant les membres étalés. À partir de là, les préposés travaillent généralement en équipe, mais parfois il arrive aussi qu'ils

travaillent seuls. Lorsqu'ils travaillent en équipe, l'un deux s'occupe généralement de transporter à l'aide du pont roulant les membres, un par un, des paniers à la semi-remorque, alors que l'autre reste sur la semi-remorque pour indiquer quel membre prendre et préparer les cales de bois. Les cales de bois sont principalement des morceaux d'érable de 4 x 4 po. mesurant 8 pi. de long. Elles sont taillées sur mesure lorsque nécessaire à l'aide de scies à chaîne.

À mesure que les membres sont chargés, les préposés s'assurent également de la qualité de la peinture si c'est nécessaire pour le client. Ils effectuent donc parfois des retouches aux membres transportés par le pont roulant ou directement sur la semi-remorque.

Si un préposé travaille seul sur un chargement, il doit donc s'occuper de toutes les opérations, ce qui l'oblige à monter et descendre souvent de la semi-remorque plateforme. Ainsi, le travail d'équipe est privilégié puisqu'il est plus efficace.

Lorsqu'il pleut ou qu'il neige en hiver, le chargement peut s'effectuer à l'intérieur dans une zone polyvalente servant soit à la peinture, au séchage ou au chargement, selon les besoins.

### **2.1.2      Entreprise B**

L'entreprise B a également fait l'objet d'observation, pendant une journée cette fois. Cette entreprise, plus petite que la première, dispose d'une zone de chargement intérieure qui permet de charger une seule semi-remorque à la fois. Par contre, cette entreprise ne charge généralement pas directement sur les semi-remorques qui effectueront la livraison. Ils disposent d'une flotte de semi-remorques plateau non légales pour la route qu'ils utilisent pour préparer les chargements et entreposer l'acier en attendant que le chantier en ait besoin, tel qu'illustré à la Figure 2.2. Ils disposent donc d'une machine fixe permettant de transférer le chargement d'acier d'une semi-remorque à une autre. Ainsi, lorsque la semi-remorque de livraison arrive, le chargement y est transféré en quelques minutes.



Figure 2.2 Entreposage sur des semi-remorques

La zone de chargement est également la zone de peinture pour cette entreprise. Les préposés y travaillent toujours en équipe de deux. Le premier est le peintre et assistant au chargement, alors que le second est assistant au peintre et responsable du chargement. Le chargement s'effectue donc en cycles, alternant avec la peinture des membres.

Lors du chargement, les membres prêts sont déjà étalés dans la zone de peinture qui est bien visible depuis la semi-remorque. Le responsable du chargement est donc situé sur la semi-remorque et opère le pont roulant à l'aide d'une télécommande sans fil. Il sélectionne les membres à charger un par un, que l'assistant attache au pont roulant. L'assistant reste donc principalement dans la zone de peinture. Le responsable place ensuite les membres attachés au pont roulant sur la semi-remorque, en plus de s'occuper au fur et à mesure de placer les cales de bois et les tailler sur mesure si nécessaire. Les cales chez cette entreprise sont également des morceaux de bois de 4 x 4 po. par 8 pi. de longueur.

### 2.1.3    **Entreprise C**

L'entreprise C a été visitée brièvement, suffisamment longtemps pour comprendre le fonctionnement de la zone de chargement. Cette entreprise procède différemment des deux premières, puisqu'au lieu de charger les membres un par un sur les semi-remorques, ils sont placés en paquets attachés avant d'être chargés. C'est le peintre qui forme ces paquets, en

attachant ensemble entre six et douze membres environ, selon leur grandeur. Il les sépare tout de même avec des cales de bois, et attache chaque paquet avec des sangles de métal. Ces paquets aux formes différentes sont ensuite transférés et entreposés dans la zone de chargement en attendant d'être chargés.

Ainsi, lors du chargement, les paquets sont placés directement sur les semi-remorques de livraison. On y place plusieurs paquets en largeur et en hauteur qu'on sépare toujours à l'aide de cales de bois similaires à celles des autres entreprises. Le chargement est donc moins long que s'il était effectué membre par membre, mais l'efficacité de ces chargements (soit le nombre total de membres chargés) semble être un peu moindre.

#### **2.1.4      Entreprise D**

L'entreprise D a également été visitée brièvement, mais assez pour comprendre le principe de la zone de chargement. Cette entreprise ne disposant pas de pont roulant pour la zone de chargement, les préposés procèdent donc à l'aide d'une grue et d'un chariot élévateur. Les membres arrivant dans la zone de chargement sont d'abord placés sur une structure permettant de former de gros paquets à l'aide de la grue. Ces gros paquets ont, généralement, la largeur de la remorque avec une hauteur et longueur variant selon la dimension des membres. Les membres sont placés sur cette structure un peu comme s'ils étaient chargés directement sur la semi-remorque, donc en suivant les mêmes principes généraux que les autres entreprises. Lorsque vient le temps de charger la semi-remorque, les paquets y sont placés à l'aide du chariot élévateur. Le chariot élévateur a une capacité suffisante pour charger une semi-remorque en environ trois à cinq voyages. Les paquets sont donc combinés pour former un chargement. Les préposés doivent donc prévoir à l'avance comment ils agenceront ces paquets sur la semi-remorque à mesure qu'ils les préparent, puisque si un paquet devient trop gros il pourrait empêcher le placement d'un autre paquet au complet, réduisant ainsi drastiquement l'efficacité du chargement.

### 2.1.5 Conclusion

La visite de ces quatre entreprises nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement général d'un fabricant de membres d'acier et celui des zones de chargement. Les visites ont également permis de constater que bien qu'il y ait plusieurs points communs, le processus de chargement pour chaque entreprise peut varier grandement. Il a été surprenant de constater que les quatre entreprises visitées avaient toutes des caractéristiques dans la zone de chargement qui pouvaient les distinguer des autres entreprises. Ainsi, nous pouvons conclure que bien qu'essentiellement, la réglementation est la même pour tous, chaque entreprise aborde le chargement à sa façon et fait face à des contraintes différentes.

## 2.2 Entrevues de candidats

Il est apparu clairement dès la première visite qu'il serait très difficile de documenter efficacement les chargements effectués chez des entreprises. En effet, chaque membre est unique ou presque, et les données virtuelles de ces membres appartiennent aux clients des entreprises, ce qui en empêche le partage. Par contre, aucune des entreprises visitées n'a vu d'inconvénient à ce qu'on prenne plusieurs photos. Bien que ces photos soient insuffisantes pour reconstituer les chargements observés, elles permettaient facilement d'inspirer la conception de plusieurs membres.

Une autre méthode doit donc être établie pour observer et documenter la manière dont procèdent les experts en chargement de membres d'acier sur semi-remorque. Étant donné que les membres de charpente d'acier dont il est question sont massifs et onéreux, que les manipuler de façon sécuritaire requiert beaucoup de temps et d'expérience et qu'en entreprise, le temps est compté, il est hors de question d'effectuer des essais sur des membres de charpente réels. En effet, des tests sur des membres d'acier engendreraient un risque à la sécurité trop grand pour tous les gens impliqués ainsi qu'une perte de temps pour les entreprises. De plus, il serait quasi-impossible de conserver le même lot de membres pour plusieurs experts de différentes provenances.

Ainsi, quelques solutions alternatives ont été envisagées. La première est de rester dans le monde virtuel, donc de modéliser des membres dans un logiciel de modélisation 3D et de les manipuler virtuellement. Une deuxième alternative est de filmer et d'observer quelques jours de travail de plusieurs travailleurs afin de documenter leur méthodologie. Une troisième alternative est de créer un ensemble de modèles réduits de membres de charpente d'acier et une plateforme de semi-remorque miniature afin de pouvoir les manipuler dans un environnement contrôlé.

La première alternative a été écartée étant donné que la manipulation virtuelle des membres risquait d'être difficile pour les travailleurs visés et que la maîtrise de l'interface risquait d'accaparer une part importante de leur attention. De plus, la stabilité et la qualité du résultat aurait été difficile à évaluer. La seconde alternative ne permet pas de reproduire précisément le résultat ni d'en avoir une représentation virtuelle fidèle. D'ailleurs, tel que précédemment mentionné, les compagnies de fabrication d'acier préfèrent ne pas partager les modèles des membres puisque ces informations sont la propriété de leurs clients.

Il reste donc l'idée de créer un ensemble de modèles réduits de membres de charpente d'acier qui permettrait de consulter plusieurs experts avec le même ensemble de données, et qui éliminerait les problèmes de sécurité et de complexité. On peut en effet interviewer plusieurs experts dans un bureau et leur demander de charger les membres miniatures sur une plateforme comme s'il s'agissait de membres réels. Cette alternative a donc été retenue. Or, cette solution soulève une autre question, à savoir, comment créer cet ensemble de modèles réduits?

Sachant que plusieurs membres aux formes et aux formats différents seraient à créer pour obtenir un échantillon représentatif de la réalité, quelques alternatives sont envisageables. Fabriquer tous ces membres à partir de matériaux pour modèles réduits architecturaux consommerait trop de temps et risquerait de trop manquer de précision. Usiner des membres miniatures serait trop dispendieux. Par contre, le prototypage rapide par fabrication additive, technologie souvent nommée « impression 3D », semble pouvoir fournir un résultat de

qualité adéquate pour un prix raisonnable. Ainsi, l'utilisation du terme « impression » ou du verbe « imprimer » pourrait être faite dans les prochaines sections en faisant référence à des pièces, comme par exemple « cette pièce a été imprimée ». Ces termes feront référence à l'utilisation de la fabrication additive.

Ainsi, nous avons décidé de créer un ensemble de membres en modèles réduits afin de réaliser des entrevues avec plusieurs préposés au chargement. Lors de ces entrevues, nous voulons demander aux candidats de placer ces membres miniatures sur une plateforme de la même échelle afin d'analyser et documenter leur processus de raisonnement. Ces entrevues permettront également d'avoir un ensemble de chargements réalisés par des experts qui seront faciles à répliquer, puisque nous aurons les modèles numériques utilisés pour l'impression. Ainsi, ces entrevues permettront de documenter les étapes suivies par les experts en plus d'avoir des exemples de chargements réalisés par des experts.

## CHAPITRE 3

### PRÉPARATION DU MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Ce chapitre documente le processus utilisé pour la fabrication des modèles réduits de membres de charpente d'acier. Bien que le choix soit déjà porté vers la fabrication additive, il faut encore trouver le fournisseur ou la machine qui nous permettra de produire notre ensemble de membres miniatures tout en respectant notre budget. Il faut trouver ou créer les modèles numériques de membres qui serviront à créer cet ensemble miniature. Il faut ensuite produire les membres miniatures. Le résultat de la fabrication est finalement décrit dans la dernière section de ce chapitre.

L'objectif en termes de quantité est d'avoir suffisamment de membres pour qu'il soit impossible de tous les placer sur le même chargement. Ainsi, les scénarios qui en découlent traiteront le problème de façon à maximiser la valeur des sorties, c'est-à-dire de placer la plus grande quantité possible de membres sur une semi-remorque. Il est donc difficile d'estimer un nombre total de membres à fabriquer. La quantité sera testée à mesure que les membres seront fabriqués, jusqu'à ce qu'il nous paraisse impossible qu'un candidat parvienne à tous les placer.

#### 3.1 Choix de la méthode de fabrication

L'objectif de cette section est d'identifier le meilleur fournisseur de services de fabrication additive pour créer un ensemble de modèles réduits de membres de charpente d'acier structurel. Ces pièces pourront ainsi être facilement manipulées par les travailleurs experts en préparation de chargement dans un environnement contrôlé. L'échelle choisie est de un vingtième (1:20) afin d'avoir des pièces suffisamment grandes pour être facilement manipulables, mais tout de même assez petites pour que le lot puisse être facilement transporté. Avec ce ratio, une remorque plateau ayant une longueur originale de 48 pi., par exemple, sera réduite à une longueur d'environ 73 cm (28,8 po.).

### **3.1.1 Fournisseurs de services de fabrication additive testés**

Le choix d'un fournisseur pour la fabrication additive des modèles réduits doit être fait en fonction des propriétés de chaque technologie disponible et des coûts. Les pièces résultantes doivent être suffisamment solides pour être manipulées malgré les parois minces qui les constituent et tout de même assez précises pour que le modèle réduit représente bien le modèle numérique. Quatre fournisseurs sont considérés : Le fournisseur en ligne Shapeways, la compagnie SolidXperts ainsi que deux départements internes à l'École de technologie supérieure (ÉTS), soit génie de la production automatisée (GPA) et génie mécanique (MEC).

#### **3.1.1.1 Shapeways**

Shapeways est une compagnie basée à New York, NY qui offre des services de fabrication additive en ligne. Elle offre une grande variété de matériaux, dont des plastiques, des céramiques et même des métaux. Trois d'entre eux sont testés, soit l' « Alumide », le « Polished strong and flexible plastic » et le « Strong and flexible plastic », qui sont tous trois des plastiques à base de nylon (Shapeways, 2013b). Le premier contient cependant de la poudre d'aluminium afin d'obtenir un effet métallique (Shapeways, 2013a). Les trois matériaux sont le résultat d'un procédé appelé le frittage sélectif par laser (SLS – Selective Laser Sintering) (Traduction : Bureau de la traduction, 2013), qui, couche par couche, transforme un lit de poudre en solide aux endroits désirés à l'aide d'un laser, ce qui correspond à la méthode de fusion sur lit de poudre présentée à la section 1.4.4.6.

#### **3.1.1.2 SolidXperts**

SolidXperts est une compagnie de Montréal offrant tous les services attachés au développement de produit, allant de la numérisation 3D à la fabrication additive, en passant par le logiciel de conception 3D SolidWorks (SolidXperts, 2011). Ils disposent de machines de marque Stratasys pour offrir leur service de fabrication additive. Le test effectué chez cette compagnie a été réalisé sur une Fortus 250mc, soit l'une des machines professionnelles de la gamme offerte par Stratasys. C'est une machine qui fonctionne par « FDM – Fused

Deposit Modeling », une technologie propriétaire de Stratasys qui est en fait de l’extrusion de plastique en fusion (Stratasys Ltd., 2011), tel que présenté à la section 1.4.4.1. Ainsi, couche par couche, une buse laisse passer aux endroits désirés un filament de plastique fondu, qui durcit une fois refroidi. Plus les couches sont minces, plus la précision est élevée mais le temps de fabrication est plus long étant donné que plus de passes sont nécessaires. Avec une Fortus 250mc, l’épaisseur des couches peut atteindre 0,007 po., soit 0,178 mm.

### **3.1.1.3 ÉTS – Département de génie de la production automatisée**

Le département de GPA dispose de deux machines de fabrication additive. La première est une CUBE de marque 3DSystems qui fonctionne par extrusion, alors que la seconde est une Objet24 de Stratasys, fonctionnant par jet de matériel photosensible, un peu comme une imprimante à jet d’encre (Stratasys Ltd., 2013). Cette dernière n’a pas été testée étant donné son coût d’opération très élevé. La machine testée, soit la CUBE de 3DSystems, bénéficie d’un prix d’opération très bas, ainsi que d’une précision d’épaisseur de 0,200 mm (3D Systems, 2013).

### **3.1.1.4 ÉTS – Département de génie mécanique**

Le département de MEC dispose également de deux machines, la première étant une Fortus 250mc de Stratasys, soit la même machine que chez SolidXperts, alors que la seconde est une Zcorp 310Mplus. Cette dernière permet de créer des pièces en matériaux réfractaires, soit des matériaux tels que du ciment ou du plâtre. Elle n’a pas été testée étant donné que ce type de matériau n’aurait pas été convenable pour le type d’application voulue. La machine testée est donc la Fortus 250mc, même si elle a déjà été testée chez un autre fournisseur.

### **3.1.2 Pièces d’essai**

Pour réaliser des tests, deux pièces furent choisies comme modèles. Elles sont toutes deux basées sur des échantillons provenant du site web de la National Institute of Standards and Technology (NIST). Cet échantillon public contient quelques structures comportant des

exemples de jonctions entre les différents éléments qui pourraient être présents dans un bâtiment réel. Étant donné qu'il est plus rentable d'effectuer les soudures en usine plutôt que sur chantier, les pièces de charpentes d'acier comportent déjà, pendant le transport, les éléments d'assemblages soudés, causant leurs formes irrégulières. Ainsi, il est important que les pièces d'essai comportent également quelques éléments soudés afin de vérifier qu'ils ne seront pas trop fragiles à manipuler.

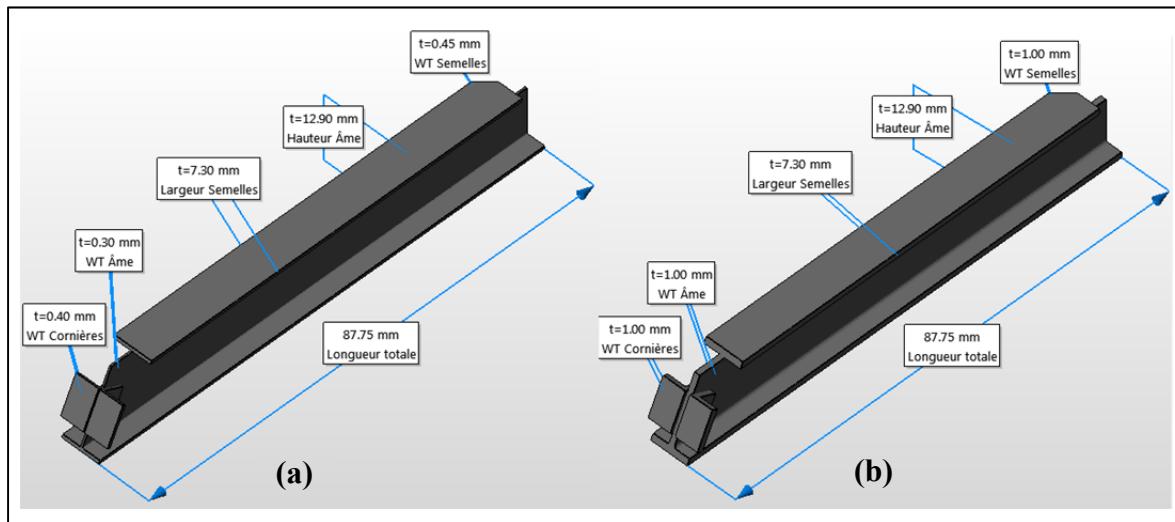


Figure 3.1 Poutre : (a) Test SolidXperts; (b) Test autres fournisseurs

La première pièce choisie, illustrée à la Figure 3.1, est une poutre comportant notamment des cornières de fixation en angle à une extrémité et ses semelles sont taillées en angle à l'autre extrémité. La seconde, une colonne illustrée à la Figure 3.2, comporte une plaque d'assise ainsi qu'un gousset sur lequel se fixerait normalement un contreventement, tous deux à la même extrémité. La colonne, contrairement à la poutre, n'est cependant pas à l'échelle de la pièce originale trouvée dans l'échantillon. Certaines de ses dimensions, dont notamment la hauteur de l'âme ainsi que la largeur et la longueur de la plaque d'assise, ont été réduites pour diminuer le coût de l'essai chez SolidXperts.

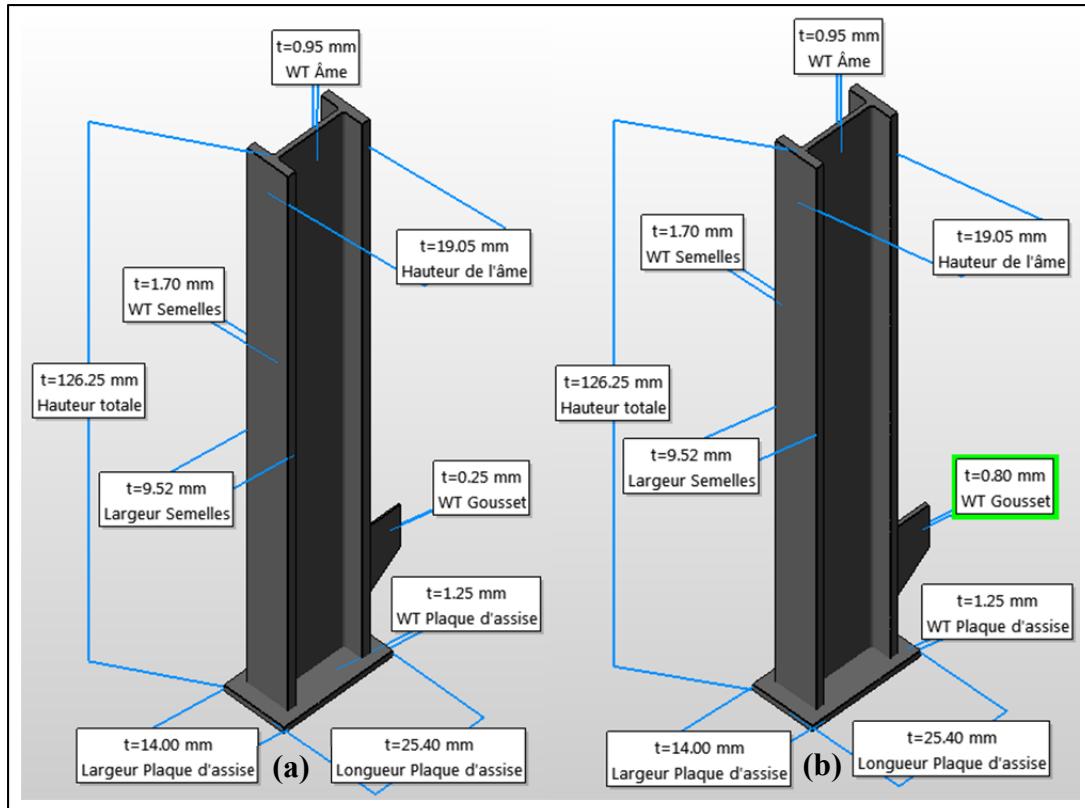


Figure 3.2 Colonne (a) Test SolidXperts; (b) Test autres fournisseurs

De plus, dans les deux cas, certaines parois ont dû être épaissies afin de respecter les épaisseurs de parois (WT – Wall Thickness) minimales (Traduction : Bureau de la traduction, 2013) imposées chez le fournisseur Shapeways. À l'exception de SolidXperts, chez qui les modèles réduits sans épaissement (dimensions affichées en (a) des Figure 3.1 et Figure 3.2) furent utilisés, les modèles aux parois épaissies (dimensions affichées en (b) des Figure 3.1 et Figure 3.2) ont été utilisés pour tous les fournisseurs afin de pouvoir comparer la précision des technologies disponibles. Le fait d'utiliser les versions originales chez SolidXperts permet de tester les limites de la machine Fortus 250mc, qui n'avaient pas été identifiées au moment de lancer la commande. De plus, une mise à l'échelle de la pièce, afin de conserver les autres dimensions proportionnelles, aurait nécessité une échelle d'environ 1:8,5 (afin que l'âme ait environ 0,7 mm d'épaisseur), ce qui est beaucoup trop grand pour nos besoins. Cette échelle est également tellement grande que les longues pièces devraient être coupées en plusieurs parties afin d'être fabriquées, puisque, tel que montré au Tableau

3.3 de la section 3.1.5 (page 78), les machines de fabrication additives comportent des limites de dimensions plutôt petites.

Les parois épaissies ne devraient d'ailleurs pas trop influencer le processus de placement des pièces par les experts, étant donné que les autres dimensions ne changent pas et qu'il devrait être très rare que ces dimensions viennent influencer le positionnement des pièces.

### **3.1.3 Évaluation des fournisseurs**

Cette section présente d'abord le résultat obtenu chez chaque fournisseur de façon qualitative et avec une description du fini des pièces. Ensuite, la précision des différentes techniques est testée quantitativement à la fin de cette section. Des mesures sont présentées et des tableaux présentent la comparaison des résultats. Les résultats présentés dans cette section sont également résumés à la section 3.1.5 Sommaire et discussion.

#### **3.1.3.1 Shapeways**

Shapeways offre un service de fabrication additive en ligne, donc il faut bien se renseigner afin de respecter les paramètres des différents procédés. Pour chaque matériau sont fournies les instructions pour que l'impression se déroule bien. Le service à la clientèle est conciliant dans les cas où tout ne se déroule pas comme prévu. Les pièces produites sont photographiées à la Figure 3.3.

Deux versions de la poutre furent produites, l'une en « strong and flexible plastic » (en blanc) et l'autre en « alumide » (couleur aluminium), alors qu'une colonne a été produite en « polished strong and flexible plastic » (en bleu). Sur la première poutre, soit celle au centre sur la photo, on peut voir quelques stries sur les surfaces des semelles, qui sont probablement dans le sens de production de la pièce. Outre cela, les surfaces sont un peu poreuses, laissant la fausse impression que de la poudre reste sur les doigts. Le prix de production pour cette poutre est de 4,58\$, ce qui est suffisamment abordable pour pouvoir produire une grande quantité de pièces avec le budget alloué.

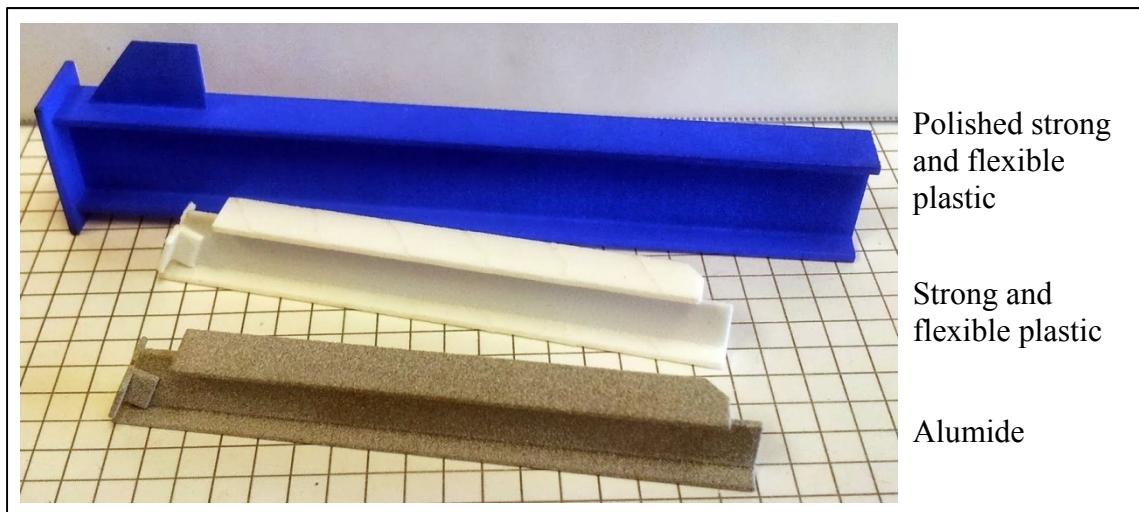


Figure 3.3 Pièces fabriquées chez Shapeways

La poutre en « alumide » offre des surfaces similairement poreuses, par contre aucun défaut ne peut être discerné sur ses surfaces. Les coins sont plus vifs et le fini aluminium donne l'impression visuelle d'avoir une pièce faite d'un métal luisant. Le prix de cette poutre est légèrement plus élevé à 5,35\$. La colonne pour sa part est moins poreuse que les deux poutres et aucun défaut n'est discernable sur ses surfaces. Son prix est de 12,04\$ puisqu'elle est un peu plus volumineuse. Les trois modèles réduits sont assez solides pour être manipulés sans risque important de les abîmer. Au total des prix de production, il faut ajouter 6,50\$ pour les frais d'expédition et 14,84\$ pour les frais de dédouanement. À noter que les frais de dédouanement comptent 10,00\$ de frais d'administration fixes facturés par la compagnie d'expédition et 4,84\$ de taxes. Le temps total entre la commande et la livraison a été de neuf jours. Ainsi, le fournisseur Shapeways offre une solution qui semble, à première vue, viable pour ce projet.

### 3.1.3.2 SolidXperts

Le service de prototypage rapide offert par SolidXperts procède par soumission, ce qui peut parfois causer des délais. Le vendeur prend par contre le temps de s'informer verbalement s'il y a des contraintes mécaniques sur les pièces pour lesquelles une orientation d'impression serait préférable plutôt qu'une autre. Une poutre et une colonne ont été

produites chez ce fournisseur à titre de tests. Ce fournisseur ne spécifiait pas de dimensions minimales, ainsi les versions originales des pièces ont été envoyées afin de voir si la machine pourrait produire une telle finesse. Les pièces produites sont photographiées à la Figure 3.4.

La poutre dans ses dimensions originales est très mince, et malgré cela le résultat obtenu est très solide. Cependant, cette faible épaisseur rend le modèle réduit plus flexible que tous les autres, surtout en torsion. Les surfaces sont lisses même si on peut voir les stries laissées par l'impression. Les coins sont plutôt vifs, mais pas autant que pour la poutre en « Alumide » de chez Shapeways. La colonne présente également des stries très fines, et les surfaces des semelles sont un peu plus rugueuses. On peut comprendre l'orientation d'impression en se fiant aux stries et aux surfaces rugueuses : Les couches étaient parallèles aux semelles. Le temps de livraison n'a pas été calculé étant donné que deux demandes de soumissions ont été transmises et que nous avons causé des délais d'évaluation. Il s'agit par contre d'un processus d'au moins trois semaines. Le prix de la poutre s'élève à 25,18\$ alors que celui de la colonne est de 52,14\$, toutes taxes comprises. Cette solution est donc largement plus chère que les autres envisagées, ce qui rend ce fournisseur trop dispendieux pour ce projet.

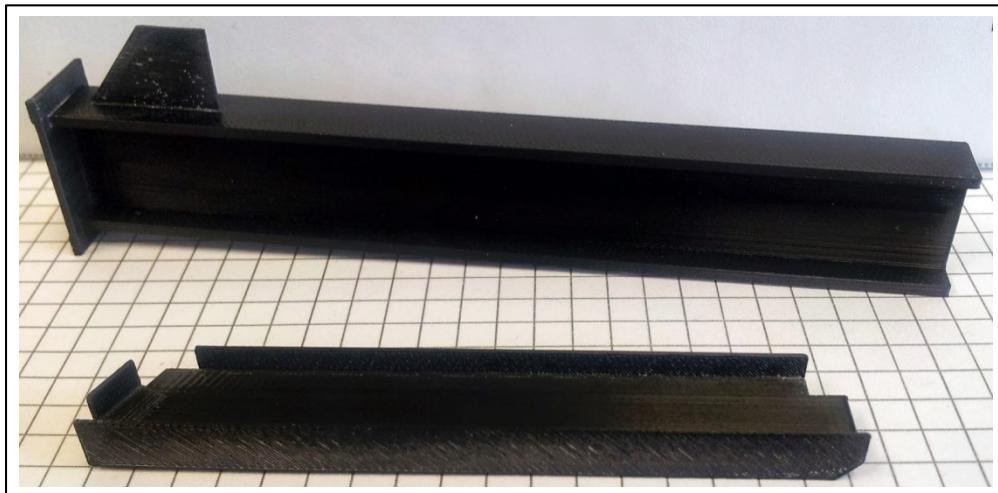


Figure 3.4 Pièces fabriquées chez SolidXperts

### 3.1.3.3 ÉTS – Département de génie de la production automatisée

La machine CUBE utilisée au département de GPA est facile d'accès et simple à opérer. Elle est la première machine de fabrication additive destinée au grand public à être vendue chez un détaillant important des États-Unis, Staples (Zimmer, 2013). Une seule pièce a été testée sur cette machine, soit la poutre, avec les mêmes dimensions que celle envoyée chez Shapeways. Elle est photographiée à la Figure 3.5.

Le résultat n'est pas vraiment comparable aux autres essais effectués. Les dimensions ne sont pas respectées, surtout au niveau de l'épaisseur des parois, et du travail manuel serait nécessaire pour retirer plusieurs défauts. Les surfaces sont plutôt lisses, mais les stries présentes sont plus grosses que celles obtenues chez SolidXperts et sont ainsi plus faciles à sentir au toucher. Bien que cette solution soit très peu onéreuse, le résultat est d'une qualité moindre comparée aux autres technologies, surtout au niveau de la précision des détails. Le temps de production a été d'environ une heure. Cette solution pourrait être retenue pour les pièces de plus grande dimension étant donné son faible coût. Étant donné le prix très faible de production, aucun frais ne nous a été facturé pour l'essai.

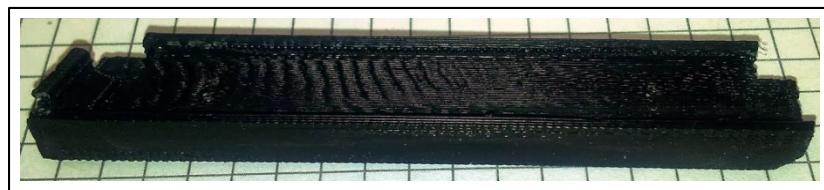


Figure 3.5 Pièce fabriquée au département de GPA

### 3.1.3.4 ÉTS – Département de génie mécanique

La machine utilisée au département de MEC est la même que celle utilisée chez SolidXperts. La poutre et la colonne, aux dimensions de celles envoyées chez Shapeways, furent tout de même testées afin de pouvoir comparer les différentes méthodes pour des pièces supposées être identiques. Le résultat est photographié à la Figure 3.6.

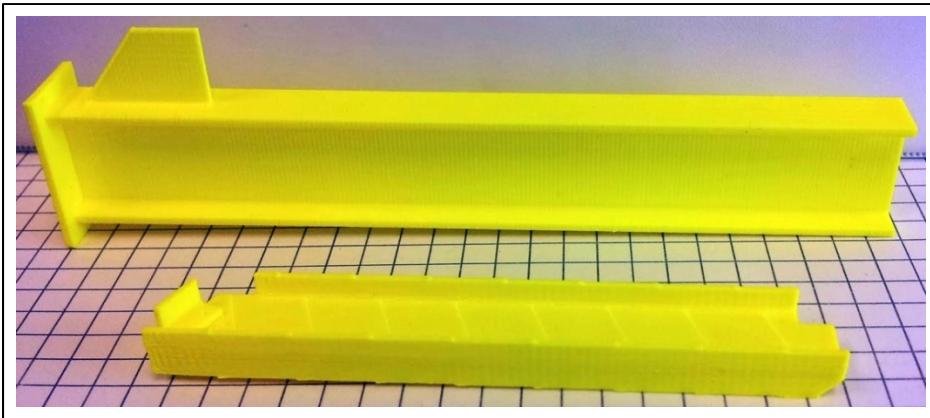


Figure 3.6 Pièces fabriquées au département de MEC

Le fini pour les deux pièces est identique à celui obtenu chez SolidXperts. Par contre, la poutre présente des stries très prononcées sur les faces de l'âme ainsi que sur les côtés des semelles. Ces stries sont attribuables à l'orientation de la pièce lors de sa fabrication, et selon le technicien elles peuvent être évitées en changeant l'orientation dans laquelle a été produite la pièce. La colonne pour sa part offre un résultat de bonne qualité. Les surfaces sont lisses et les stries ne sont presque pas visibles. Les coins des deux pièces sont vifs et les dimensions sont bien respectées. Le prix pour les deux pièces n'a pas été calculé précisément mais devrait être inférieur à 5,00\$, ce qui fait de cette solution la plus intéressante considérant le rapport qualité/prix. De plus, le temps de production a été d'environ deux heures pour les deux pièces.

### 3.1.4 Exactitude

Des mesures de dimensions ont été effectuées sur les pièces afin de comparer la précision des différentes technologies. Chaque mesure présentée dans les deux tableaux (Tableau 3.1 et Tableau 3.2) correspond à la moyenne d'au moins trois mesures effectuées avec un pied à coulisse de marque SAMONA. Les erreurs relatives ont été calculées suivant l'équation (3.1) :

$$Erreur\ relative = \left| \frac{valeur_{cible} - valeur_{mesurée}}{valeur_{cible}} \right| \cdot 100\% \quad (3.1)$$

Comme on peut le voir, on ne considère que la valeur absolue de l'erreur relative puisque dans notre cas, le signe n'a aucune importance.

Concernant les poutres, dont les valeurs des mesures sont présentées au Tableau 3.1, nous pouvons voir que la majorité des mesures sont en deçà de 15% d'erreur relative, excepté pour la pièce du département de GPA et la poutre fabriquée chez SolidXperts.

Les trois premières poutres illustrées, soit les deux de chez Shapeways et celle du département de MEC, comportent toutes trois une seule mesure au-dessus de 15% d'erreur relative. Cela laisse croire que selon l'orientation de fabrication de la pièce, il y a toujours une plus grande erreur pour un des axes.

Celle de GPA a une erreur énorme pour la mesure de l'épaisseur de l'âme, puisqu'au lieu d'être 1 mm d'épais, l'âme a une épaisseur de 2,34 mm. Il y a également une erreur importante pour les semelles et les cornières concernant leur épaisseur. Cela laisse donc croire, connaissant l'orientation de la pièce lors de sa fabrication, que cette machine offre une précision moindre dans le plan de son plateau, et qu'elle est un peu mieux suivant l'axe vertical. De plus, on peut déduire que cette machine n'est pas précise pour les épaisseurs en deçà d'environ 1,5 à 2 mm.

Tableau 3.1 Mesures réelles moyennes (mm) et erreur relatives des poutres

Mesures (mm)	WT	WT	WT	Largeur	Hauteur	Longueur
	Semelles	Âme	Cornières	Semelles	Âme	Total
Valeur cible	1,00	1,00	1,00	7,30	12,90	87,75
Shapeways (Alumide)	0,98	1,24	0,95	7,50	12,92	87,47
Erreur relative	2,3%	24,0%	5,3%	2,7%	0,1%	0,3%
Shapeways (Nylon)	1,39	0,92	0,93	7,23	13,24	87,62
Erreur relative	39,0%	7,7%	6,7%	0,9%	2,6%	0,1%
Dép. MEC	1,14	1,24	1,03	7,59	12,91	87,63
Erreur relative	13,7%	24,0%	3,0%	4,0%	0,1%	0,1%
Dép. GPA	1,48	2,34	1,90	7,96	12,94	86,12
Erreur relative	47,7%	134,0%	90,3%	9,0%	0,3%	1,9%
Valeur cible	0,45	0,30	0,40	7,30	12,90	87,75
SolidXperts	0,56	0,75	0,73	7,26	13,17	87,41
Erreur relative	24,8%	151,1%	81,7%	0,6%	2,1%	0,4%

Finalement, la Fortus 250mc de chez SolidXperts, sur laquelle la poutre qui avait des épaisseurs moindres que les autres a été testée afin de trouver la limite de cette machine, n'est pas parvenue à réaliser une épaisseur inférieure à 0,56 mm. Les trois épaisseurs voulues étaient respectivement de 0,45, 0,30 et 0,40 mm selon le même ordre que les colonnes du tableau. En observant les dimensions obtenues, on peut déduire qu'une épaisseur minimale pour cette machine serait dans les alentours de 0,6 à 0,7 mm.

Tableau 3.2 Mesures réelles moyennes (mm) et erreur relatives des colonnes

Mesures (mm)	Long. Pl. Ass.	Larg. Pl. Ass.	WT Pl. Ass.	WT Gou.	Larg. Sem.	WT Sem.	WT Âme	Haut. Âme	Haut. Tot.
<b>Valeur cible</b>	25,40	14,00	1,25	0,80*	9,52	1,70	0,95	19,05	126,25
<b>Shapeways</b>	25,40	13,94	1,46	0,81	9,47	1,70	0,94	19,06	126,18
<b>Erreur relative</b>	0,0%	0,4%	17,1%	0,8%	0,5%	0,0%	1,1%	0,1%	0,1%
<b>Dép. MEC</b>	25,40	13,99	1,38	0,89	9,52	1,75	0,96	19,05	126,71
<b>Erreur relative</b>	0,0%	0,1%	10,4%	11,7%	0,0%	2,9%	0,7%	0,0%	0,4%
<b>SolidXperts</b>	25,53	14,16	1,41	0,77*	9,54	1,81	0,95	19,26	125,89
<b>Erreur relative</b>	0,5%	1,1%	11,5%	67,5%	0,2%	6,1%	0,2%	1,1%	0,3%

\* Le WT cible pour le gousset de la pièce envoyée chez SolidXperts était de 0,25 mm.

En ce qui concerne les colonnes, toutes les dimensions sont en deçà de 15% d'erreur relative à l'exception de l'épaisseur du gousset de chez SolidXperts, qui était supposé être de 0,25 mm. Cette imprécision accentue l'idée qu'il soit difficile d'obtenir une épaisseur en deçà de 0,6 à 0,7 millimètres avec la Fortus 250mc.

### 3.1.5 Sommaire et discussion

Les cinq technologies différentes testées comportent chacune des avantages et inconvénients et d'autres caractéristiques à considérer. Ces éléments sont résumés dans le Tableau 3.3. Par exemple, la plupart des machines explorées ici peuvent imprimer différentes couleurs, bien qu'une seule couleur puisse être utilisée à la fois. La couleur n'est cependant pas un critère de sélection dans le cadre de ce projet. Les machines de fabrication additive comportent également des dimensions maximales et parfois aussi minimales comme dans le cas de Shapeways. Les prix sont également différents pour chaque machine. Ainsi, le Tableau 3.3 présente un résumé des spécifications de chaque technologie.

Tableau 3.3 Comparaison des technologies disponibles

Fournisseur	SolidXperts	Dép. de MEC	Shapeways			Dép. de GPA
Machine	Stratasys Fortus 250mc		Machines de marque EOS non spécifiées			3DSystems CUBE
Pièce(s) testée(s)	Poutre et Colonne	Poutre et Colonne	Poutre	Poutre	Colonne	Poutre
Procédé	Extrusion		Frittage sélectif au laser			Extrusion
Matériel	ABSplus P430		Nylon avec poudre d'aluminium	Nylon blanc	Nylon poli et coloré	ABS
Fini de surface	Lisse avec stries fines		Poreux	Poreux avec stries très fines	Lisse	Lisse avec stries marquées
Prix* unitaire	~2,14\$/cm <sup>3</sup> +10\$/pièce	~0,40 \$/cm <sup>3</sup>	1,99\$US/cm <sup>3</sup> + 1,50\$US/pièce	1,40\$US/po <sup>3</sup> + 1,50\$US/pièce	1,50\$US/cm <sup>3</sup> + 2,00\$US/pièce	~49\$ par cartouche
Supports à payer?	Oui	Oui	Non			Oui
Autres frais	Taxes; Frais d'envoi.	Aucun	Frais d'envoi de 6,50\$US ou plus par commande; Frais de dédouanement de 10\$ par commande (UPS); Taxes de douane			Aucun
Prix* total du test (\$CA)	77,32	<5,00	28,47\$US + 14,84\$CA			Non facturé
Délai approx.	Semaines	Heures ou Jours	Jours ou Semaines			Heures ou Jours
Dimensions maximales (mm)	254x254x305		230x180x310	650x350x550	150x150x150	140x140x140
Épaisseur minimale WT** (mm)	~0,6		0,8 (supporté) 0,9 (non supporté)	0,7	0,7	~1,5 – 2
Support	Soluble		Poudreux			À peiner ou sabler

\* Dollars canadiens sauf si autrement spécifié. Prix comportant un ~ sont convertis en \$/cm<sup>3</sup> à partir de \$/po<sup>3</sup> en considérant 16,39 cm<sup>3</sup>/po<sup>3</sup>

\*\* Épaisseurs comportant un ~ sont déduites selon les essais effectués

D'abord, tel que discuté précédemment, toutes les technologies pourraient être utiles puisqu'à la base, aucune des pièces produites n'est trop fragile pour être manipulée. Il s'agit donc de trouver le meilleur rapport entre la qualité du résultat et le prix pour pouvoir produire un jeu comptant le nombre requis de pièces tout en respectant le budget alloué. Selon ce critère, on peut déjà éliminer SolidXperts, chez qui le prix est trop élevé.

On peut voir que la machine du département de MEC offre sans équivoque le meilleur prix pour la qualité, sans avoir de désavantage majeur. Ses dimensions permettront de faire une bonne partie des pièces, surtout les plus petites. Les technologies offertes par Shapeways sont également acceptables, bien qu'un peu plus dispendieuses. L'utilisation du nylon blanc, soit du « Strong and flexible plastic », permet de produire des pièces aux dimensions plus grandes que toutes les autres machines, ce qui pourrait être utile dans le cas de pièces très longues mais étroites. Finalement, la machine du département de GPA offre le prix le plus bas, par contre sa précision est moins bonne, ses dimensions maximales sont petites et il faut quand même travailler manuellement le fini de la pièce pour obtenir un résultat satisfaisant. Si on découvrait les plus grosses pièces en plusieurs morceaux pour ensuite les coller, il pourrait être possible de produire de plus grosses pièces à un bas prix. Cependant, on pourrait appliquer le même raisonnement pour la machine du département de MEC.

### 3.1.6 Conclusion

Le département de génie mécanique offre sans équivoque la meilleure solution pour la production d'un lot de modèles réduits de pièces de charpente d'acier structurel. Bien que toutes les technologies testées soient acceptables au niveau de la solidité des pièces et de leur fini, le prix, les délais et les dimensions maximales et minimales des machines indiquent toutes que la Fortus 250mc du département de MEC offre la meilleure solution. Pour les pièces les plus longues, nous aurons le choix de les découper en plusieurs morceaux, de les fabriquer au département de MEC et d'ensuite les coller, ou de les fabriquer chez Shapeways d'un seul morceau en nylon blanc (Strong and flexible plastic), puisque cette machine offre des dimensions permettant de fabriquer des pièces allant jusqu'à 65 cm de long à un prix

plutôt abordable. Par exemple, la colonne originale ayant servi comme inspiration pour créer le modèle réduit de colonne testé, dans ses dimensions à l'échelle 1:20 mesurerait presque 40 cm de long. Elle pourrait être produite chez Shapeways pour environ 55 à 60\$ plus les frais de transport et de douane, alors qu'aucune autre machine ne peut la produire directement sans la découper en plusieurs morceaux.

### 3.2 Modèles de membres

Avant de pouvoir fabriquer les membres miniatures, il faut d'abord disposer de modèles numériques. Ces modèles doivent pouvoir représenter une situation réelle rencontrée par les experts. Étant donné la difficulté à trouver une entreprise prête à partager des données réelles, nous avons décidé de créer notre propre ensemble de pièces à l'aide d'un logiciel de conception de structure d'acier, soit SDS/2 de Design Data. Ce logiciel dispose sur Internet de plusieurs vidéos de tutoriaux, qui indiquent comment construire une structure de base, personnaliser les connexions et plusieurs autres opérations indispensables (SDS/2 by Design Data, 2012). Grâce à ces vidéos, une structure de base a été créée, formant un petit bâtiment. Cette première structure fut celle utilisée pour apprendre à utiliser le logiciel. Un exemple de conception de structure est illustré à la Figure 3.7.

Une fois les fonctions indispensables du logiciel maîtrisées, un nouveau projet a été créé avec l'idée de fabriquer les membres conçus en versions miniatures grâce à la fabrication additive. Ainsi, bien que l'échelle de fabrication était de un vingtième (1:20), le modèle virtuel des pièces était conçu à l'échelle originale (1:1) afin d'utiliser les poutres et autres pièces d'acier standard disponibles dans le logiciel. Toutefois, pour la majorité des membres créés, les versions des poutres offrant une épaisseur de paroi plus épaisse était choisie afin de permettre de respecter les épaisseurs minimales nécessaires à l'impression des membres au format réduit. Ainsi, les membres créés dans ce modèle numérique étaient tous surdimensionnés afin qu'il n'y ait pas de problèmes lors de l'impression. Les sections de poutre choisies, par exemple, étaient celles dont la paroi la plus mince était suffisamment épaisse pour, après réduction, respecter le minimum de l'imprimante 3D.

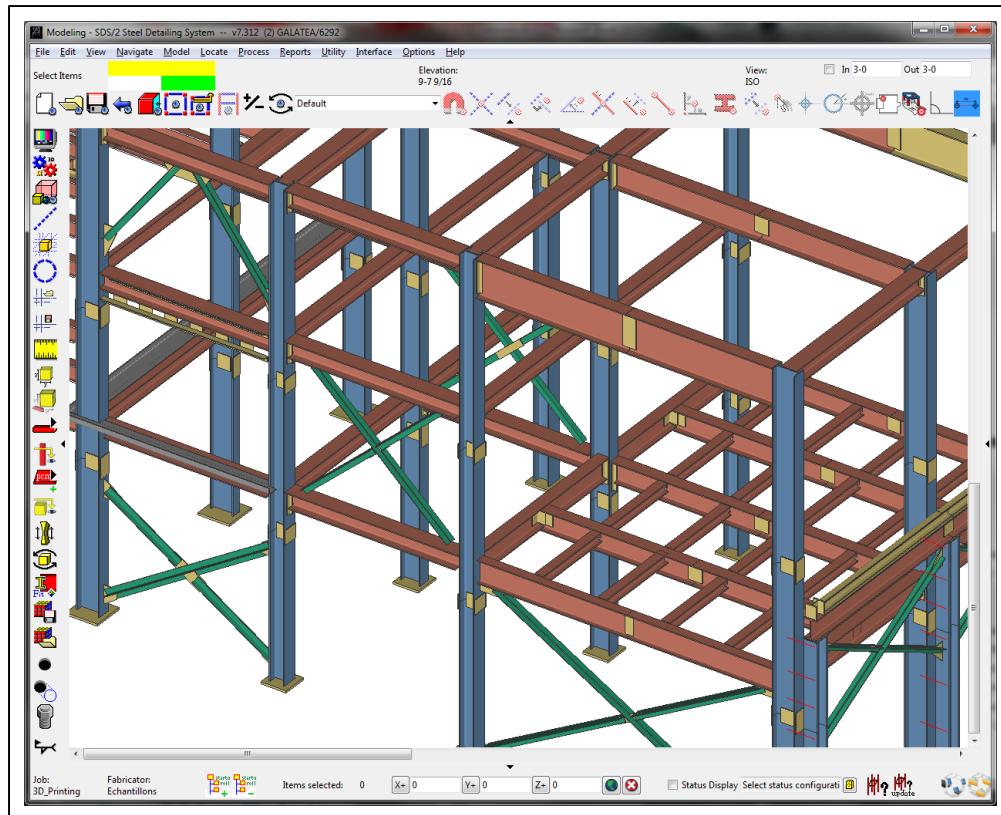


Figure 3.7 Capture d'écran du logiciel SDS/2 de Design Data

Le nouveau projet de membres virtuels a débuté avec l'idée d'imprimer les membres avec la machine disponible au département de MEC. Ainsi, la première structure a été conçue en gardant en tête que les membres miniatures ne pouvaient pas dépasser 10 po. de longueur (afin de pouvoir les imprimer à plat), ce qui se traduit, après conversion, à une longueur maximale de 16 pi. 8 po. pour la conception. Ainsi, plusieurs membres de 15 pi. et quelques membres plus longs, coupés en deux et avec une jonction permettant de les coller une fois imprimés, ont été conçus. Tous les membres étaient conçus avec comme inspiration les membres aperçus lors des visites d'entreprises et pris en photos.

Une première vague de fabrication a ensuite été lancée, dont les détails des pièces résultantes sont disponibles à la section suivante, soit la section 3.4. Bien que le résultat était très satisfaisant au niveau de la qualité et de la précision, le coût d'impression pour cette première vague fut beaucoup plus haut que prévu selon les données disponibles lors des tests. En effet,

le tarif a été modifié et était désormais calculé au nombre d'heures d'utilisation de la machine en plus du coût du matériel. Le prix de la première vague s'est élevé à 472,64\$ pour 12 membres différents.

Ainsi, après cette première vague, il a fallu réévaluer les options disponibles selon notre budget. Considérant le coût très faible de l'imprimante du département de GPA, nous avons décidé d'utiliser cette machine pour les membres subséquents malgré la précision plus faible et la nécessité de travailler les morceaux manuellement après l'impression pour les finaliser. Nous avons pu emprunter la machine afin de fabriquer les membres miniatures à notre rythme.

Étant donné que les paramètres d'impressions ont changé, il a fallu concevoir de nouveaux membres dans SDS/2 pour épaisser les parois et réduire la longueur des membres à imprimer. La nouvelle imprimante ayant une zone d'impression de 5,5 x 5,5 x 5,5 po., la longueur maximale lors de la conception devenait 9 pi. 2 po. La plupart des membres devaient donc être découpés en trois sections à coller. Afin d'accélérer le processus de conception, la forme initiale du bâtiment n'a plus été retenue et les membres furent tous conçus un par un, toujours en s'inspirant des membres vus lors des visites. La Figure 3.8 donne un exemple de membre conçu, puis découpé et placé afin d'être imprimé en plusieurs morceaux.

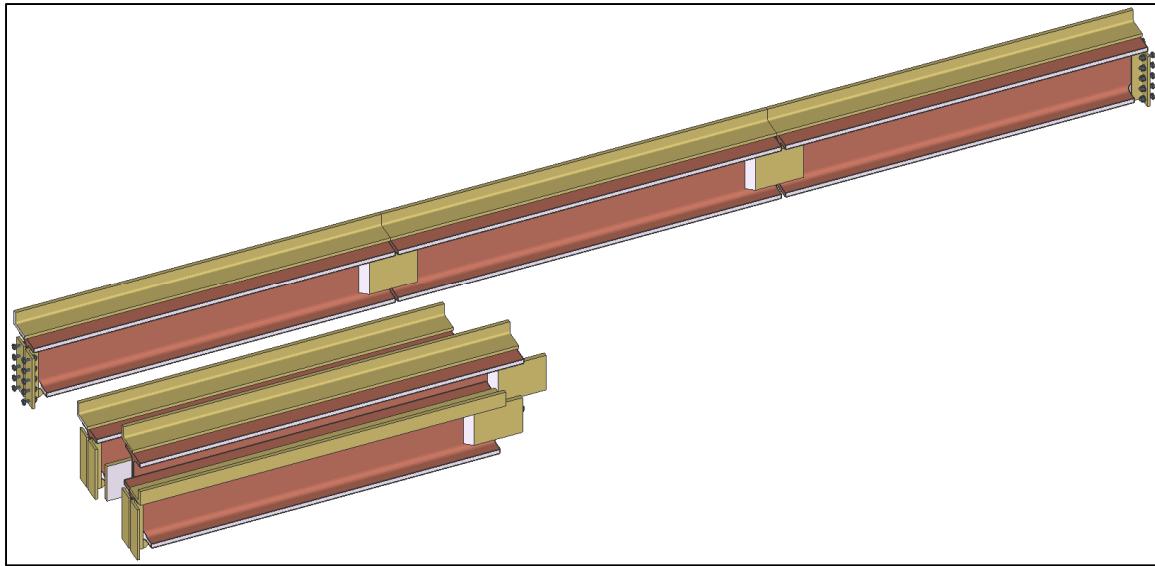


Figure 3.8 Membre conçu puis découpé pour l'impression 3D

Ainsi, pour cette machine, 24 modèles de membres différents ont été conçus. Les détails de ces membres sont également disponibles à la section 3.4.

Tous les modèles numériques créés à l'aide du logiciel SDS/2 furent exportés au format VRML, soit un des formats qui pouvait être lu par un autre logiciel, MeshLab, afin de les convertir au format STL. Ensuite, ces fichiers STL étaient ouverts dans le logiciel NetFabb Studio afin de les redimensionner selon l'échelle 1:20 et s'assurer de leur intégrité pour l'impression.

### 3.3 Impression avec la CUBE

Tel que mentionné à la section précédente, après avoir imprimé une première vague de membres avec l'imprimante Stratasys Fortus 250mc du département de MEC, nous avons dû changer notre choix d'imprimante étant donné le prix plus élevé que prévu. Contrairement aux autres options d'impression, la machine CUBE du département de GPA était suffisamment petite et simple à opérer pour qu'on puisse l'emprunter et l'opérer nous-même. Il a donc fallu déterminer la meilleure façon pour imprimer les membres avec une qualité acceptable.

La première vague d'impression avec cette machine a été faite avec les membres tout simplement placés à l'horizontale sur le plateau d'impression, en se servant d'une semelle comme appui. Or, ce choix s'est avéré mauvais étant donné la longueur des surfaces imprimées à chaque couche. Étant donné que le plastique fondu est imprimé couche par couche sur une surface chauffée, les premières épaisseurs restent chaudes alors que celles plus hautes refroidissent plus rapidement. Cela cause, pour le matériau utilisé, une contraction des couches dernièrement imprimées à mesure qu'elles refroidissent.

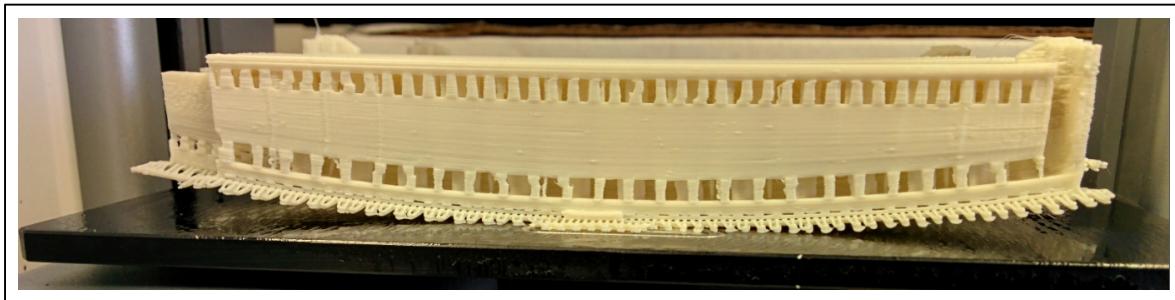


Figure 3.9 Membre défectueux à cause d'une courbure

Au final, les membres comportaient donc des surfaces courbées, tel qu'illustré à la Figure 3.9, alors que normalement les deux semelles auraient dû être parallèles. Sur cette figure, on peut voir une pièce défectueuse, toujours sur la surface d'impression, dont les extrémités ont décollé à cause de la différence de température dans le plastique.

Pour pallier à ce problème, la solution fut d'imprimer les morceaux de membres à la verticale, afin que la surface sur le plateau d'impression soit plus petite mais tout de même suffisamment grande pour soutenir convenablement les morceaux. Ainsi, chaque membre imprimé l'était en plusieurs morceaux pour accommoder les dimensions maximales d'impressions et ces sections étaient placées côté à côté et reliés ensemble avec de petits supports afin d'éviter l'effet de courbure et permettre un soutien suffisant. Cette méthode a donc été utilisée pour toutes les pièces subséquentes. La Figure 3.10 montre un membre en cours d'impression avec cette méthode. Le membre est séparé en trois sections qui sont

placées côte à côte à la verticale et qui sont reliées entre-elles par de petits supports afin d'assurer leur stabilité.

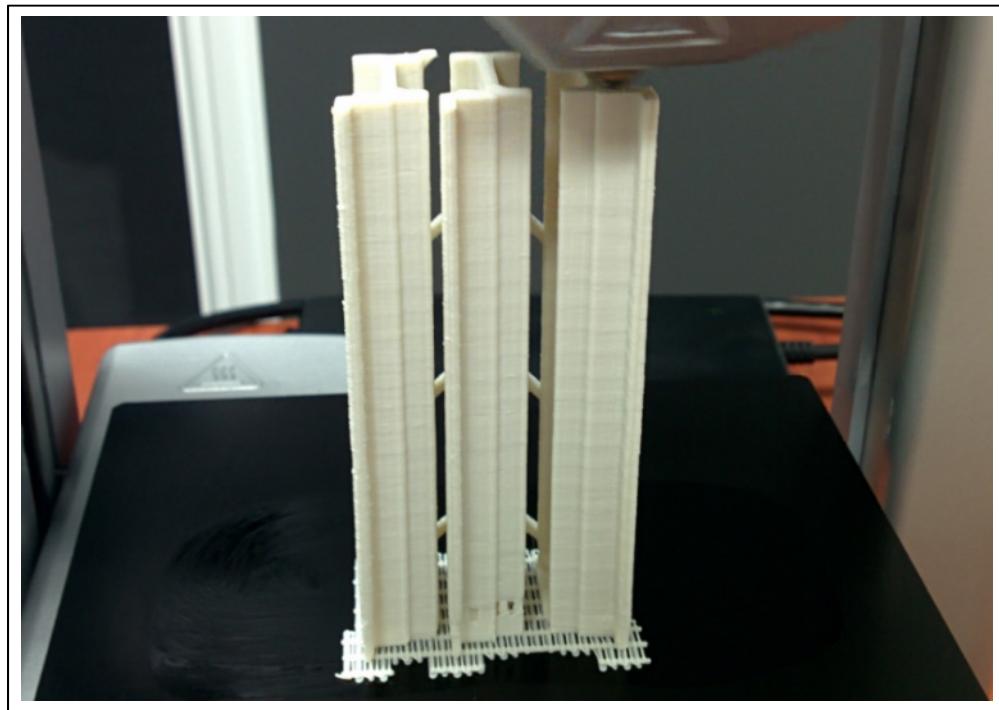


Figure 3.10 Membre imprimé à la verticale en trois sections

### 3.4 Résultat de la fabrication

Au total, incluant les membres imprimés lors des tests des différentes options d'impression, 86 membres ont été fabriqués. Ces membres ont été imprimés à partir de 38 modèles différents. Certains de ces modèles sont donc répétés plusieurs fois. La couleur d'impression n'étant pas importante, plusieurs couleurs ont été utilisées selon la disponibilité. Lorsque le choix de couleur était possible, nous avons décidé d'utiliser des couleurs variées afin d'avoir un contraste dans les photos et les vidéos. Les pièces ont toutes été identifiées selon leur modèle numérique par un code de lettres et chiffres. Ce nombre n'a pas été choisi, nous avons simplement décidé d'épuiser les cartouches de plastique entamées jusqu'à ce qu'on ait suffisamment de pièces pour qu'il soit impossible de toutes les placer sur le même chargement. Ainsi, on pose le problème comme étant une maximisation de valeur de sortie,

c'est-à-dire que les préposés auront à placer le plus grand nombre possible de pièces sur la semi-remorque.

En plus des membres fabriqués, deux plateformes ont été découpées dans du bois afin de représenter des semi-remorques plateau de 48 et 53 pi. Des cales ont aussi été fabriquées, à l'échelle des cales standards de 4x4 po. par 8 pi. Certaines de ces cales ont été coupées sur la longueur pour éviter aux candidats d'avoir à les couper, alors que d'autres ont été faites plus minces pour représenter les autres épaisseurs de cales parfois utilisées par les préposés, obtenues en pratique par le recours à une scie à chaîne ou par l'utilisation de planches réutilisées.

Deux jauge ont également été fabriquées afin de vérifier que la hauteur du chargement n'excède pas la hauteur maximale. Elles ont été fabriquées comme si le plancher des remorques était à 5 pi. du sol, ce qui laisse 8 pi. 6 po. de hauteur pour le chargement, étant donné la limite de hauteur totale de 13 pi. 6 po. applicable au Canada et aux États-Unis.

### **3.4.1    Liste des membres**

La liste des pièces est donnée au Tableau 3.4. Elle indique le code donné à chaque modèle de pièce, la section et la longueur originale du membre, soit avant la réduction, ainsi que la quantité fabriquée pour chaque modèle. Notez qu'aucune pièce B6 n'a été fabriquée, il s'agit d'une erreur de numérotation lors de la conception. Notez également que les pièces SB2 et SB3 correspondent aux poutres et colonnes fabriquées en tests et qu'elles ont été conçues directement à l'échelle d'impression, sans être basées sur une section existante.

Les membres débutant avec la lettre D, ainsi que les membres C4 et C5 sont ceux qui ont été fabriqués avec l'imprimante du département de MEC. Les membres S2 et S3 sont ceux fabriqués lors des tests des différentes méthodes d'impression. Toutes les autres pièces ont donc été fabriquées avec la CUBE de 3D Systems.

Tableau 3.4 Liste des membres fabriqués

Pièce	Section	Longueur (Pi.)	Quantité	Total
D1	W14x120	15	1	10
D2	W14x120	15	1	
D3	W12x96	15	1	
D4	W14x120	15	1	
D5	W14x120	15	1	
D6	W14x120	15	1	
D7	W36x150	31	1	
D8	W21x93	25	1	
D9	W18x119	25	1	
D10	W12x190	18,5	1	
BB	N/A	32	2	2
B1	W14x159	25	3	18
B2	W14x159	25	3	
B3	W14x159	25	2	
B4	W14x159	25	3	
B5	W14x159	25	4	
B7	W14x159	25	3	
B8	W18x143	25	3	10
B9	W18x143	25	2	
B10	W18x143	25	2	
B11	W18x143	25	3	
C1	W21x166	40	1	5
C2	W21x166	40	1	
C3	W21x166	40	1	
C4	W14x120	38	1	
C5	W21x147	38	1	
MB1	W16x89	15	5	23
MB2	W16x89	15	4	
MB3	W16x89	15	2	
MB4	W16x89	15	2	
MB5	W16x89	15	3	
MB6	W16x89	15	3	
MB7	W16x89	15	4	
WB1	W27x217	15	1	2
WB2	W27x217	15	1	
SB1	W12x106	6	8	16
SB2	N/A	5,75	5	
SB3	N/A	8,30	3	
Total				86

### 3.4.2 Photos des membres

Les photos de chaque famille de membres sont disponibles en ANNEXE I. La Figure 3.11 illustre le placement standard des pièces pour les entrevues. Ainsi, afin de ne pas influencer les candidats dans l'ordre de placement, tous les chargements débuteront avec le même placement initial des pièces sur la table. Dans le cas présent certaines pièces sont absentes étant donné qu'elles ne faisaient pas partie du scénario.



Figure 3.11 Placement standard des membres pour l'entrevue

## CHAPITRE 4

### COLLECTE DE DONNÉES

#### 4.1 Protocol expérimental

Cette section présente l'essentiel du protocole expérimental utilisé lors des entrevues de candidats.

##### 4.1.1 Objectif

Cette activité a pour but de documenter le raisonnement ou les étapes que suivent les experts en chargement de charpente d'acier, afin de pouvoir s'en inspirer pour l'élaboration d'un algorithme générant des patrons de chargements virtuels. Afin d'avoir une idée assez représentative des étapes réelles, nous croyons qu'il faut passer en entrevue au minimum cinq travailleurs expérimentés d'au moins un an provenant de trois compagnies différentes. Bien que cet échantillon puisse paraître petit, nous considérons que l'expérience des travailleurs, combiné aux questions et à la réalisation de trois scénarios de chargement chacun, nous permettra d'obtenir suffisamment de données pour documenter leur raisonnement.

##### 4.1.2 Méthodologie

Afin d'obtenir des résultats aussi près de la réalité que possible, nous avons choisi de créer un ensemble de modèles réduits en plastique qui peuvent facilement être manipulées et qui représentent des membres de charpente d'acier. Étant donné la difficulté d'obtenir des données réelles auprès des fabricants de membres d'acier, nous avons choisi de créer notre propre ensemble de données à l'aide d'un logiciel de modélisation de charpente d'acier, soit SDS/2. À partir de ces données, nous avons séparé les différents membres de charpente d'acier, nous avons réduit leur échelle à un ratio d'un vingtième (1:20) et nous les avons produits par fabrication additive, un procédé généralement nommé impression 3D.

Une fois l'ensemble de modèles réduits fabriqué, nous avons passé en entrevue différents experts en chargement d'acier pour voir comment ils procéderaient s'ils faisaient face à ces mêmes membres dans la réalité. Puisque les modèles réduits sont facilement transportables, il était aisément de faire ces entrevues directement chez les entreprises participantes ou sinon chez Prodevco Industries. Nous leur présentions une planche représentant une semi-remorque plateforme ainsi que les membres en modèles réduits étalés sur la table comme ils seraient étalés dans l'aire de chargement. Cet étalage était standardisé afin qu'il soit identique pour tous les participants. Ils disposaient également de morceaux de bois pouvant servir de cales, à l'échelle des cales de bois utilisées réellement. Puisque certains assemblages de bois requièrent d'être cloués, nous fournissons du ruban adhésif pour fixer les modèles réduits des cales.

Afin d'enregistrer leur façon de procéder, nous filmions la plateforme pendant qu'ils placent les pièces. Seules leurs mains étaient captées par la caméra afin de pouvoir préserver leur anonymat.

Ce protocole expérimental a obtenu l'approbation du Comité Éthique de Recherche de l'ÉTS.

#### **4.1.3 Déroulement des entrevues**

Les entrevues étaient individuelles et avaient une durée d'environ deux à trois heures. Elles étaient effectuées dans un lieu déterminé avec chaque candidat selon ses disponibilités et besoins.

##### **4.1.3.1 Plan**

Voici le déroulement typique d'une entrevue :

- 1) Rencontre / accueil du participant.
- 2) Explication du projet (Objectifs de l'entrevue, contraintes, etc.).
- 3) Présentation des formulaires (éthique), explication de l'aspect volontaire de participer.
- 4) Questions du début (Voix enregistrée)

- 5) Présentation des pièces et des contraintes du scénario #1
- 6) Scénario de chargement #1 : Le candidat prépare un chargement (Plateforme filmée)
- 7) Questions concernant le chargement, si applicable
- 8) Présentation des pièces et des contraintes du scénario #2
- 9) Scénario de chargement #2 : Le candidat prépare un chargement (Plateforme filmée)
- 10) Questions concernant le chargement, si applicable
- 11) Présentation des pièces et des contraintes du scénario #3
- 12) Scénario de chargement #3 : Le candidat prépare un chargement (Plateforme filmée)
- 13) Questions concernant le chargement, si applicable
- 14) Questions de la fin (Voix enregistrée)
- 15) Fin

#### **4.1.3.2 Scénarios**

Voici une brève description des trois scénarios que les participants devaient réaliser.

##### **4.1.3.2.1 Scénario #1**

Sur la plateforme représentant une semi-remorque de 48 pi., tenter de placer le plus de membres possibles. Il est permis de dépasser à l'arrière d'environ l'équivalent d'un mètre. Si le candidat le demande, il lui sera également permis de définir lui-même les règles pour dépasser à l'avant. Les membres miniatures suivants ne sont pas inclus dans ce scénario : Les deux BB, WB1 et WB2.

##### **4.1.3.2.2 Scénario #2**

Sur la plateforme représentant une semi-remorque de 53 pi., tenter de placer le plus de membres possibles. Il n'est pas permis de dépasser à l'arrière. Si le candidat le demande, il lui sera permis de définir lui-même les règles pour dépasser à l'avant. Tous les membres sont inclus dans ce scénario. Les membres suivants doivent absolument être chargés : C1 à C5, les deux BB, WB1 et WB2.

#### 4.1.3.2.3 Scénario #3

Sur la plateforme représentant une semi-remorque de 53 pi., tenter de placer le plus de membres possibles. Il n'est pas permis de dépasser à l'arrière. Si le candidat le demande, il lui sera permis de définir lui-même les règles pour dépasser à l'avant. Les membres suivants ne sont pas inclus dans ce scénario : C2 à C5, les deux BB, WB1 et WB2.

#### 4.1.3.3 Questions

Bien que les questions concernant les chargements effectués par les participants venaient sur le vif de l'activité, voici les questions qui ont été systématiquement posées à tous les participants au début de l'entrevue :

- 1) Quelle importance accordez-vous au fini de surface des pièces (peinture, égratignures, etc.)?
- 2) Comment est géré l'ordre d'arrivée des pièces dans la zone de chargement?
- 3) Accordez-vous une importance à la répartition du poids sur la semi-remorque?
- 4) Si oui, dans quelle mesure?
- 5) Quel est l'objectif principal lorsque vous chargez une semi-remorque?
- 6) Quelle contrainte est la plus contraignante selon vous? Dimension, poids maximal, stabilité, etc.?
- 7) Comment gérez-vous le poids chargé sur la semi-remorque? Comment savez-vous la limite de poids à mettre sur une semi-remorque?
- 8) Quelles informations sur les pièces vous sont disponibles? Sous quel format?
- 9) Y a-t-il parfois des moments où il faut vous arrêter pour réfléchir comment vous placerez certaines pièces?
- 10) Si oui, à quelle fréquence? Quel genre de situation impose de tels moments?
- 11) Est-ce que d'avoir un ordre prédéfini et un emplacement pour chaque pièce pourrait aider votre travail?
- 12) Vous préoccupez-vous de l'ordre de déchargement des pièces sur le chantier?
- 13) Certaines pièces doivent-elles parfois être placées obligatoirement sur une semi-remorque spécifique?

Et voici quelques questions qui étaient posées en fin d'entrevue :

- 1) Croyez-vous que cette activité représente bien votre réalité de travail?
- 2) Y a-t-il certaines informations concernant les pièces ou le chargement qui sont manquantes à vos yeux, ou qui pourraient être pratiques à avoir?

- 3) Croyez-vous que d'avoir accès à un modèle 3D virtuel des pièces préalablement à leur chargement pourrait aider?

#### **4.1.4 Compensation financière**

Une compensation financière était offerte aux candidats qui complétaient l'entrevue intégralement. Le montant de la compensation a été fixé à 100\$, peu importe la durée totale de l'entrevue.

#### **4.1.5 Données numériques**

Les enregistrements audio et vidéo étaient effectués autant que possible afin de préserver l'anonymat des participants. Pendant les enregistrements audio, nous tentions d'éviter de nommer le participant par son nom et d'évoquer des informations personnelles, tel que la compagnie qui l'embauche. Nous évitions de filmer le visage du participant lors du chargement de la plateforme.

De plus, toutes les données recueillies ont été cryptées suivant un protocole d'encryptage reconnu et utilisé par les gouvernements américains et canadiens, soit l'Advanced Encryption Standard (AES) (Federal Information Processing Standards Publication, 2001). Le logiciel utilisé à ces fins est le logiciel libre TrueCrypt 7.1a. Ainsi, seules les personnes disposant d'un mot de passe peuvent accéder aux enregistrements d'un candidat, même si le support d'enregistrement (disque dur, carte mémoire, etc.) est perdu ou volé. Les données sont séparées dans cinq fichiers cryptés avec des mots de passe différents, un par candidat. Les personnes disposant des mots de passe sont l'étudiant, Guillaume Bolduc et le professeur Louis Rivest.

Les données de recherche seront conservées pendant une période de 10 ans après la fin du projet de recherche par le professeur Louis Rivest, alors que les données confidentielles (Nom, adresse, numéro de téléphone, etc.) des participants seront détruites à la fin du projet de recherche.

## 4.2 Recrutement des candidats

### 4.2.1 Candidats types recherchés

Pour cette activité, nous recherchions des préposés expérimentés au chargement de l'acier en vue de son transport. Ces travailleurs devaient donc travailler chez un fabricant d'acier qui prépare principalement des membres de charpente d'acier pour construire des bâtiments. Les candidats devaient avoir travaillé au chargement de l'acier pendant au moins un an, afin d'avoir une expérience suffisante.

### 4.2.2 Recrutement

L'entreprise partenaire de ce projet, Prodevco Industries, nous a fourni des contacts dans plusieurs entreprises qui pouvaient nous mettre en contact avec des préposés au chargement. Nous avons donc contacté ces gens, leur avons expliqué notre projet et leur avons fourni la documentation nécessaire à transmettre aux candidats potentiels afin qu'ils puissent nous contacter. Les contacts en entreprise ont donc proposé l'activité aux préposés et ont soit recueilli une liste des intéressés, soit ils leur ont indiqué de nous contacter directement. Les contacts en entreprise ont également effectué les démarches nécessaires pour obtenir une autorisation écrite d'une personne d'autorité dans l'entreprise, afin de prouver que nous avions l'accord de leurs employeurs pour l'activité.

### 4.2.3 Candidats recrutés

Nous sommes parvenus à recruter cinq candidats provenant de trois fabricants d'acier différents, soit les entreprises A, B et D visitées. Quatre des cinq candidats travaillent dans le domaine de l'acier depuis plus de 8 ans, alors que le cinquième y travaille depuis 3 ans. Ils ont tous occupé le poste de préposé au chargement pendant plus d'un an. Les cinq candidats respectent donc tous les critères établis pour cette activité.

### 4.3 Transcriptions

Les enregistrements audio et vidéo ont été transcrits en écrivant le discours du candidat et du responsable de l'entrevue. De plus, les chargements réalisés par les candidats ont été transcrits en ordre chronologique, étape par étape, afin qu'il soit possible de les répliquer. Des images de chaque étape sont donc incluses dans les transcriptions. Les transcriptions, totalisant une centaine de pages, sont disponibles sur demande en contactant les auteurs de ce mémoire. Le premier scénario du candidat #3 est fourni à la section 4.3.1 à titre d'exemple. La transcription a également servi de base d'analyse pour identifier les différents principes de chargement.

Les réponses des questions posées à chacun des candidats ont également été transcrrites. Toutes les réponses sont agrégées sous la même question afin de pouvoir facilement comparer les différentes réponses. Les réponses de la question #7 sont fournies à la section 4.3.2 à titre d'exemple.

#### 4.3.1 Exemple de transcription : Candidat #3, scénario #1

Afin de conserver l'intonation et le sens des dialogues, les transcriptions ont été faites phonétiquement, donc certains termes ou mots peuvent être déformés, en anglais, etc. Les dialogues sont les textes en italique; ceux en noir sont ceux du candidat alors que ceux en gras et colorés en rouge sont les questions ou les commentaires passés par le responsable de l'entrevue. La transcription du premier scénario du candidat #3 est disponible à l'ANNEXE II EXEMPLE DE TRANSCRIPTION. La Figure 4.1 présente le résultat final de ce scénario.



Figure 4.1 Photo du résultat du scénario #1 pour le candidat #3

#### 4.3.2 Exemple de transcription : Question #7

À titre d'exemple, les transcriptions des réponses données à la question #7 par les cinq candidats sont présentées à l'ANNEXE III TRANSCRIPTION DE LA QUESTION #7. Encore une fois, les dialogues sont en italique. Ceux en noir sont ceux des candidats, alors que ceux en gras colorés en rouge sont ceux du responsable de l'entrevue.

#### 4.4 Conclusion partielle

Les entrevues nous ont permis de discuter et d'observer cinq candidats expérimentés et de leur faire réaliser trois scénarios de chargement chacun, excepté le premier candidat qui n'a réalisé que deux scénarios dans le temps donné. Ainsi, au total, nous avons 14 chargements disponibles dans les transcriptions qui sont tous basés sur les mêmes membres et les mêmes contraintes. Suite à l'analyse de ces transcriptions, nous avons défini des termes en vue de l'élaboration d'un algorithme et avons documenté les principes de chargement dictés ou suivis par les préposés. Les résultats de l'analyse sont disponibles au chapitre suivant.

## CHAPITRE 5

### RÉSULTATS

Le résultat de l'analyse des entrevues est donné dans les deux premières sections de ce chapitre, soit les définitions et les principes de chargement. Ensuite, une proposition d'algorithme est fournie, donc les idées générales sorties tout au long de ce projet y sont exposées.

#### 5.1 Définitions

Deux catégories de termes sont présentées. La première, les termes généraux, sont les termes qui sont déduits des observations et des entrevues afin de définir les concepts généraux spécifiques au domaine. La seconde catégorie, soit les termes spécialisés proposés, sont des termes utilisés pour décrire les problèmes et les solutions nécessaires pour manipuler les concepts directement liés à la création de l'algorithme visé.

##### 5.1.1 Termes généraux

Les termes généraux sont ceux qui sont déduits des observations et entrevues et qui servent à définir les concepts généraux spécifiques au domaine.

###### 5.1.1.1 Membre

Un membre est un « élément, généralement linéaire, qui entre dans la constitution d'une charpente. » (OQLF, 2004). Pour le présent projet, il sera également considéré comme étant un ensemble composé d'une pièce principale et de pièces secondaires (tel que plaques, angles, tubes, etc.). La pièce principale est généralement la pièce la plus grande sur laquelle les autres pièces viennent se rattacher.

### 5.1.1.2 Pièce

Tout élément ou morceau d'acier pouvant être soudé, assemblé ou fixé d'une quelconque façon. Il peut s'agir de poutres, de profilés, de plaques, d'angles, etc.

### 5.1.1.3 Pièce principale

Pièce à laquelle se rattachent toutes les autres pièces dans un membre. Voir la Figure 5.1 pour un exemple.

### 5.1.1.4 Pièce secondaire ou Élément d'un membre

Pièce qui est attachée à une pièce principale. Voir la Figure 5.1 pour un exemple.

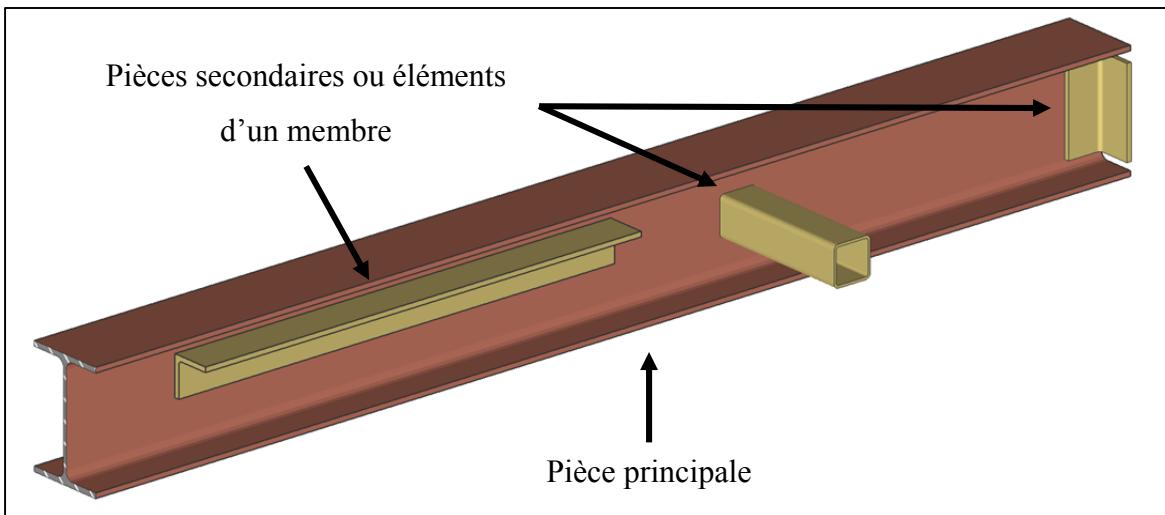


Figure 5.1 Identification de la pièce principale et des pièces secondaires sur un membre

### 5.1.1.5 Couché ou Horizontal

En parlant d'une poutre, la pièce est placée de sorte qu'elle soit appuyée sur ses deux semelles, ainsi l'âme est parallèle à la surface sur laquelle la pièce est déposée, tel qu'illustré à la Figure 5.2.

### 5.1.1.6 Debout ou Vertical

En parlant d'une poutre, la pièce est placée de sorte qu'elle soit appuyée sur une semelle, tel qu'illustré à la Figure 5.2.

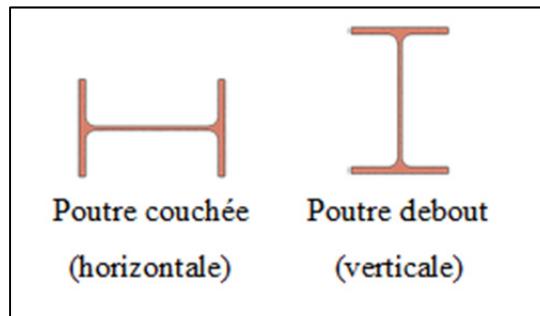


Figure 5.2 Positions d'une poutre

### 5.1.1.7 Fer à fer

Membres n'ayant aucune cale les séparant. Ils entrent donc en contact l'un avec l'autre. Quelques exemples sont illustrés à la Figure 5.3.

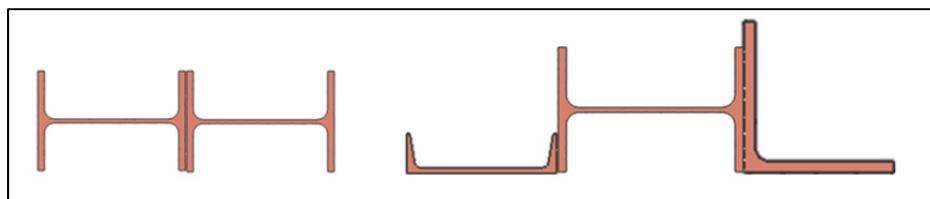


Figure 5.3 Exemples de membres fer à fer qui ne sont pas intercalés

### 5.1.1.8 Intercalés fer à fer ou Fer sur fer

Par exemple, deux poutres en I de même dimension intercalées de façon à ce qu'au moins une de leurs semelles soit appuyée sur l'âme de l'autre poutre, et vice-versa. Dans le cas d'angles, simplement les empiler « en cuillère ». Quelques exemples sont illustrés à la Figure 5.4. Le mot intercalé ajoute donc le fait qu'un des membres entre à l'intérieur de la surface de référence (définition 5.1.2.1) d'un autre membre en plus d'avoir un contact direct fer à fer.

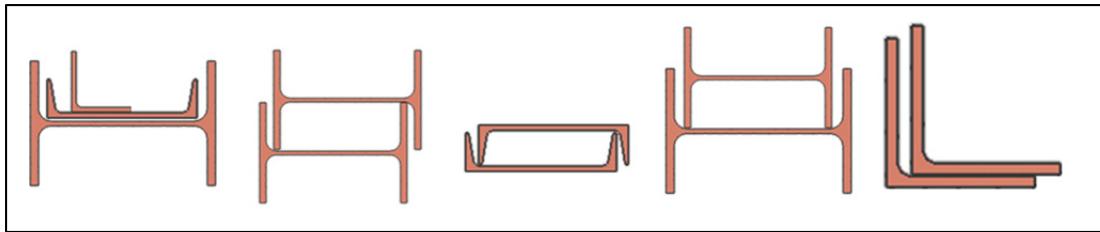


Figure 5.4 Exemples de membres intercalés fer à fer

#### 5.1.1.9 Cale

Pièce de bois franc utilisée pour stabiliser et séparer les membres. Les cales les plus utilisées sont des morceaux d'érable de 4x4 po. ayant la même longueur que la largeur de la remorque, soit généralement 8 pi. D'autres planches plus minces peuvent également être utilisées.

#### 5.1.1.10 Boîte

Ensemble de cales formant une structure rectangulaire ou en forme de prisme trapézoïdal destiné à occuper un espace plus haut qu'une seule cale, tout en étant stable. Une boîte en forme de prisme trapézoïdal est photographiée à la Figure 5.5. Les boîtes en forme de prisme trapézoïdal sont souvent nommées « pyramides » ou « en forme de pyramide » par les préposés.



Figure 5.5 Exemple d'une boîte en forme de prisme trapézoïdal, ou « pyramide »

### 5.1.1.11 Crochet

Outil servant à soulever les membres. Le crochet est généralement utilisé au bout d'une chaîne.

### 5.1.1.12 Sangle

Outil servant à soulever les membres. La sangle sert principalement lorsqu'on souhaite préserver le fini de surface des membres puisqu'elle est faite de tissus.

### 5.1.1.13 Lasso

Boucle formée avec une chaîne ou une sangle qui se serre lorsqu'on tire sur une des extrémités. Cette extrémité est normalement attachée au pont roulant afin que les membres se fassent serrer et qu'ils ne glissent pas lors de manipulations.



Figure 5.6 Chaîne munie de crochets (gauche) et sangle (droite)

### 5.1.1.14 Pinces

Outil servant à soulever les membres. La pince comporte un mécanisme auto-serrant qui ferme les pinces lorsque le pont roulant la soulève. Ainsi, c'est l'outil le plus rapide pour manipuler les membres, par contre il peut laisser des marques sur le fini de surface.



Figure 5.7 Exemple de pince serrant un membre

#### **5.1.1.15 Pivot d'attelage**

« Axe en forme de pivot, fixé à la contre-sellette d'attelage d'une semi-remorque et destiné à accoupler celle-ci à la sellette d'attelage d'un tracteur. » (OQLF, 2006) Le pivot d'attelage est donc l'élément mécanique de la semi-remorque qui la relie et la retient au tracteur.

#### **5.1.1.16 Taille ou Dimension de la plateforme**

Dimensions de la semi-remorque plateforme sur laquelle le chargement est effectué. On considère principalement la largeur et la longueur. Sur une semi-remorque plateforme, la largeur est généralement de 8 pi. alors que la longueur est généralement de 53 pieds. On voit des remorques de 48 pieds également. Certaines remorques peuvent comporter deux plateaux à des hauteurs différentes. On fait généralement référence à ces remorques comme étant « dropdeck ».

#### **5.1.1.17 Semi-remorque « drop deck »**

Semi-remorque plateau dont la majeure partie de la plateforme est abaissée afin de permettre un plus grand espace de chargement en hauteur. Étant donné que le pivot d'attelage doit être

à la même hauteur qu'une semi-remorque plateau régulière, la section avant de la semi-remorque est tout de même à la hauteur habituelle. Ainsi, la semi-remorque « drop deck » comporte deux niveaux.

#### 5.1.1.18 Axes de la remorque

Bien qu'il y ait plusieurs possibilités de systèmes d'axes à utiliser sur la semi-remorque, pour le reste de ce document le système d'axe utilisé est celui situé à l'avant, du côté du chauffeur. Ainsi, lorsqu'on parle de longueur, on fait référence à l'axe des X, lorsqu'on parle de largeur, on fait référence à l'axe des Y et finalement la hauteur fait référence à l'axe des Z. On peut également parler de longitudinal, transversal et perpendiculaire à la remorque pour les axes X, Y et Z respectivement.

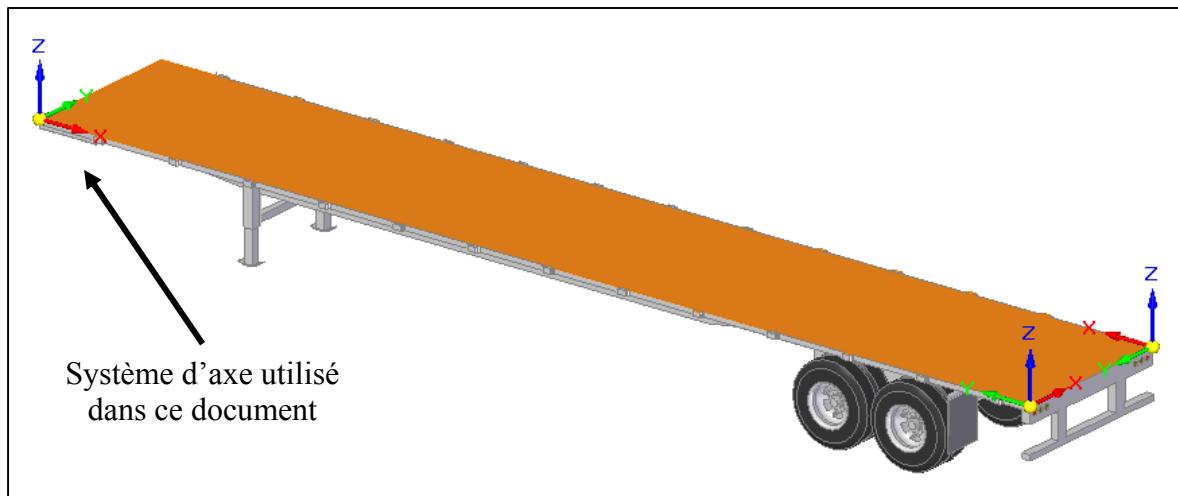


Figure 5.8 Systèmes d'axes suggérés  
Modèle numérique adapté de Brown (2009)

#### 5.1.1.19 Plans sur une remorque

Trois plans principaux sont identifiés sur une remorque : Vertical, horizontal et transversal. Utiliser la Figure 5.9 comme référence.

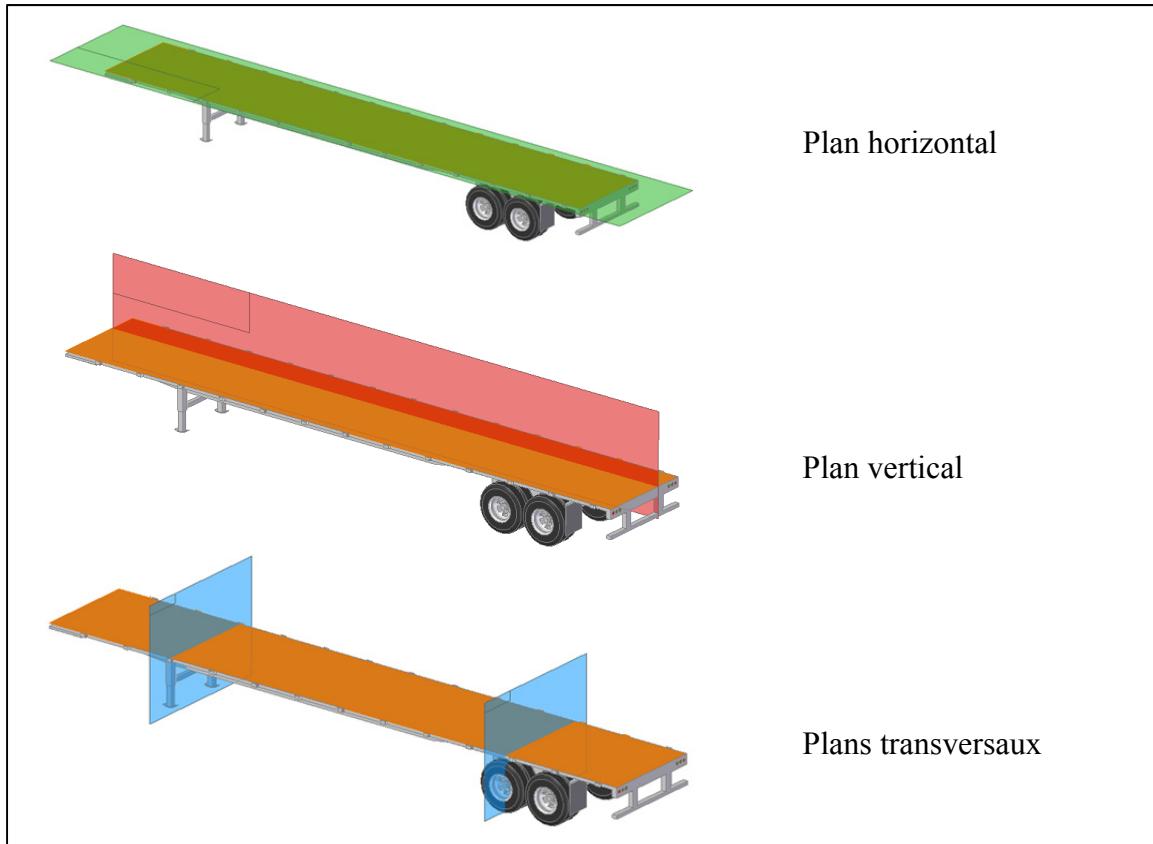


Figure 5.9 Plans sur une remorque  
Modèle numérique adapté de Brown (2009)

#### 5.1.1.20 Espace exploitable

Forme géométrique (généralement un prisme rectangulaire) délimitant la limite maximale de chargement sur une semi-remorque plateforme. Par exemple, une remorque de 48 pieds permet généralement d'avoir un chargement dépassant d'un mètre à l'arrière. De plus, selon le tracteur utilisé et la position de sa sellette, le chargement peut parfois dépasser à l'avant de quelques pieds. On peut aussi autoriser parfois le chargement à dépasser à l'avant selon une forme arrondie, tel qu'illustré à la Figure 5.10, puisque le chargement ne doit pas entrer en contact avec le tracteur lorsque celui-ci effectue des virages. Ainsi, on autorise parfois les membres centraux à dépasser plus que les membres placés sur les côtés. Le chargement n'est pas autorisé à dépasser sur les côtés de la remorque.

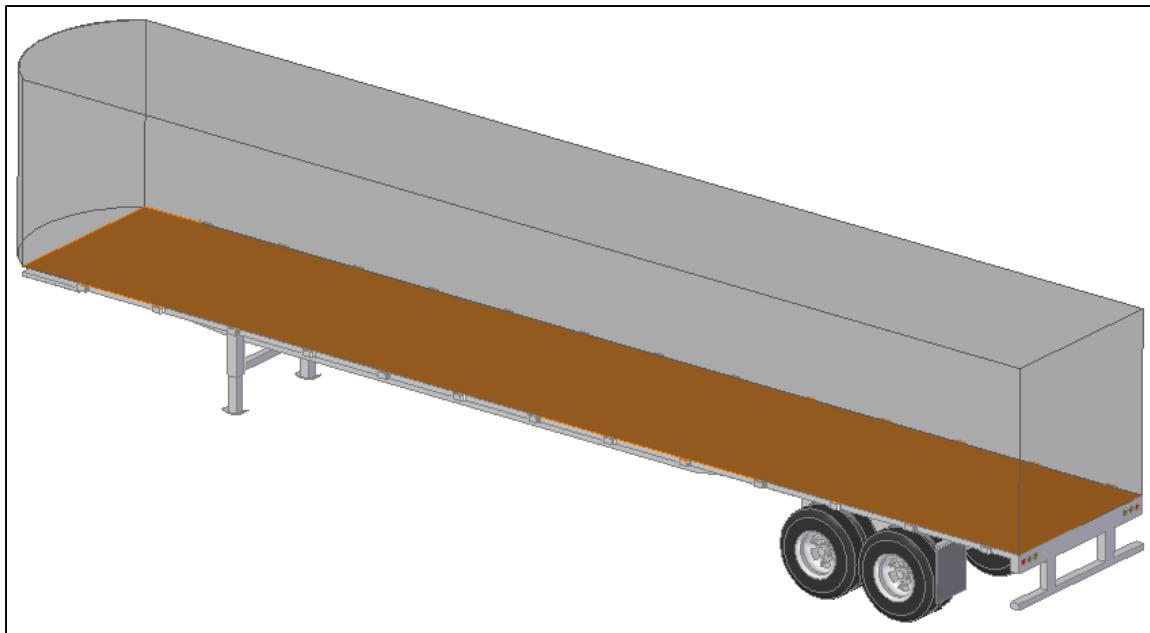


Figure 5.10 Exemple d'espace exploitable avec l'avant courbé  
Modèle numérique adapté de Brown (2009)

#### 5.1.1.21 Nomenclature des orientations

Ces termes servent à indiquer l'orientation de la dimension la plus grande d'une pièce secondaire par rapport à la pièce principale sur laquelle elle se rattache, ou encore l'orientation d'un membre par rapport à la semi-remorque.

##### 5.1.1.21.1 Longitudinal

Lorsque référant à une pièce secondaire par rapport à une pièce principale, la pièce secondaire est placée de sorte que sa dimension la plus grande soit orientée dans le même sens que la dimension la plus grande de la surface sur laquelle elle est apposée, tel qu'illustré à la Figure 5.11. La pièce secondaire peut parfois dépasser de la surface sur laquelle elle est apposée, par exemple si elle est placée sur la semelle d'une poutre.

Lorsque référant à un membre par rapport à une semi-remorque, la dimension la plus grande du membre est dans le même sens que la dimension la plus longue de la remorque (Axe X pointé dans la Figure 5.8).

#### **5.1.1.21.2 Transversal**

Lorsque référant à une pièce secondaire par rapport à une pièce principale, la pièce secondaire est placée de sorte que sa dimension la plus grande soit orientée perpendiculairement à la dimension la plus grande de la surface sur laquelle elle est apposée. Par contre, la dimension la plus grande de la pièce secondaire est tout de même parallèle à la surface sur laquelle la pièce est apposée, tel qu'illustré à la Figure 5.11. La pièce secondaire peut parfois dépasser de la surface sur laquelle elle est apposée, par exemple si elle est placée sur la semelle d'une poutre.

Lorsque référant à un membre par rapport à une semi-remorque, la dimension la plus grande du membre est dans le même sens que les essieux de la remorque (Axe Y pointé dans la Figure 5.8). Par exemple, les cales sont généralement placées transversalement à la remorque.

#### **5.1.1.21.3 Perpendiculaire ou Orthogonal**

Lorsque référant à une pièce secondaire par rapport à une pièce principale, la pièce secondaire est placée de sorte que sa dimension la plus grande soit perpendiculaire à la surface sur laquelle elle est apposée, tel qu'illustré à la Figure 5.11. La pièce secondaire peut parfois dépasser de la surface sur laquelle elle est apposée, par exemple si elle est placée sur la semelle d'une poutre.

Lorsque référant à un membre par rapport à la semi-remorque, la dimension la plus grande du membre est perpendiculaire à la surface de la remorque (Axe Z pointé dans la Figure 5.8). Cette situation ne peut par contre pas s'illustrer par un exemple réaliste étant donné que cette orientation n'est jamais utilisée.

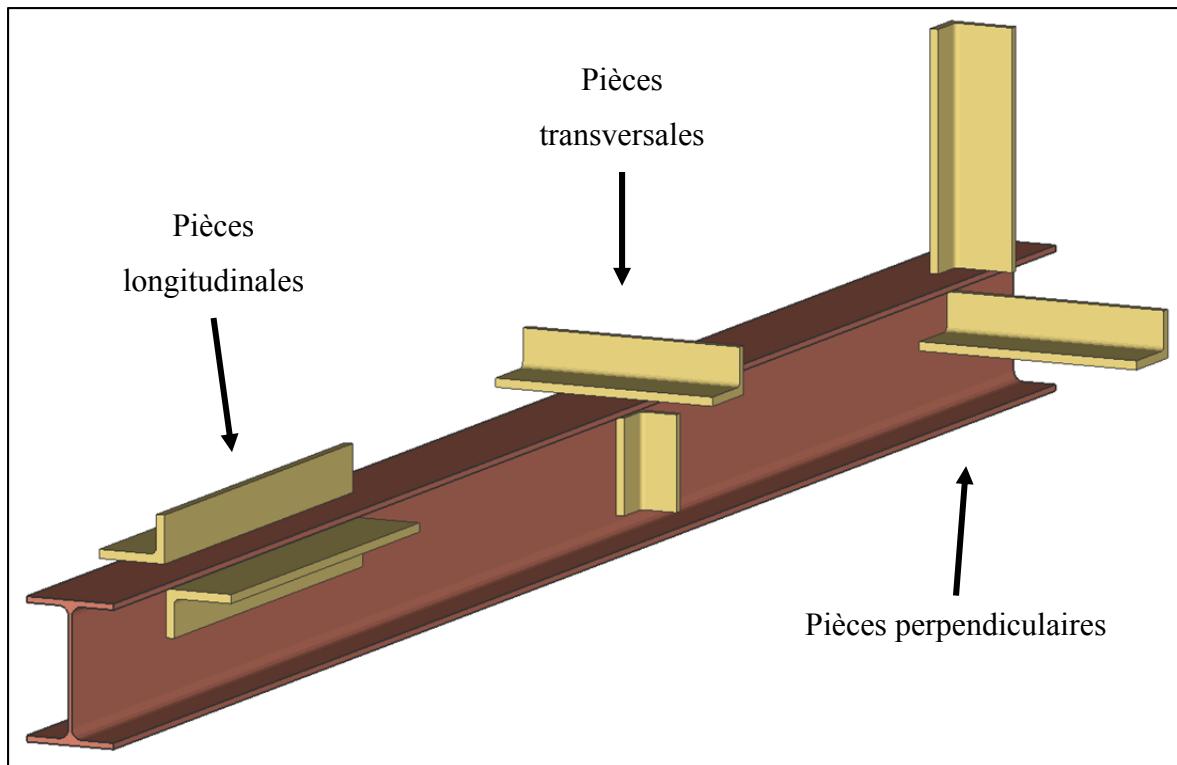


Figure 5.11 Positions relatives des pièces secondaires sur un membre

### 5.1.2 Termes spécifiques proposés

#### 5.1.2.1 Surfaces de référence

Plans apposés aux surfaces de l'enveloppe de la pièce principale lorsqu'aucune pièce secondaire n'y est attachée. Pour une poutre, il y en a quatre, formant le rectangle le plus petit dans lequel la section s'insère. Voir la Figure 5.12 pour quelques exemples. Dans le cas d'un membre, même si des pièces secondaires y sont attachées, les surfaces de références considèrent tout de même seulement la pièce principale, sans les secondaires. Ainsi, les surfaces de référence d'un membre sont également l'enveloppe du membre (définition ci-dessous) la plus simple que ce membre puisse avoir.

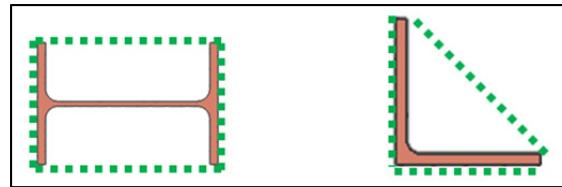


Figure 5.12 Surfaces de référence (en vert pointillé) sur une poutre et un angle

### 5.1.2.2 Enveloppe du membre

Endroit sur lequel viennent s'appuyer les cales de bois ou les autres membres. Dans certains cas, on peut omettre certaines pièces secondaires si on considère qu'on adapte la cale pour les contourner (Par exemple en taillant une fente dans la cale). Des exemples sont illustrés à la Figure 5.13. L'enveloppe du membre la plus simple, c'est-à-dire celle initiale ou de base, est identique aux surfaces de référence du membre. L'enveloppe du membre sera utilisée pour déterminer où seront situées les surfaces d'appui (définition ci-dessous).

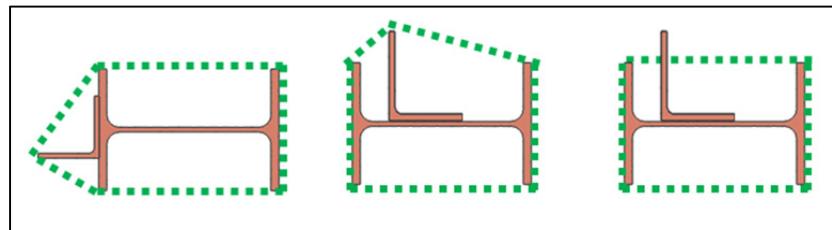


Figure 5.13 Enveloppe du membre

### 5.1.2.3 Surface d'appui

Plan qui est parallèle au plan horizontal de la remorque et sur lequel les cales de bois s'appuient. La surface d'appui peut être inférieure (celle qui s'appuie sur des cales) ou supérieure (celle qui supporte les cales). Ces concepts sont illustrés à la Figure 5.14. La surface d'appui inférieure doit nécessairement être parallèle à une des surfaces de l'enveloppe du membre, alors que la surface d'appui supérieure peut être placée sur une arête, tel qu'illustré dans les situations (b) et (c) de la Figure 5.14.

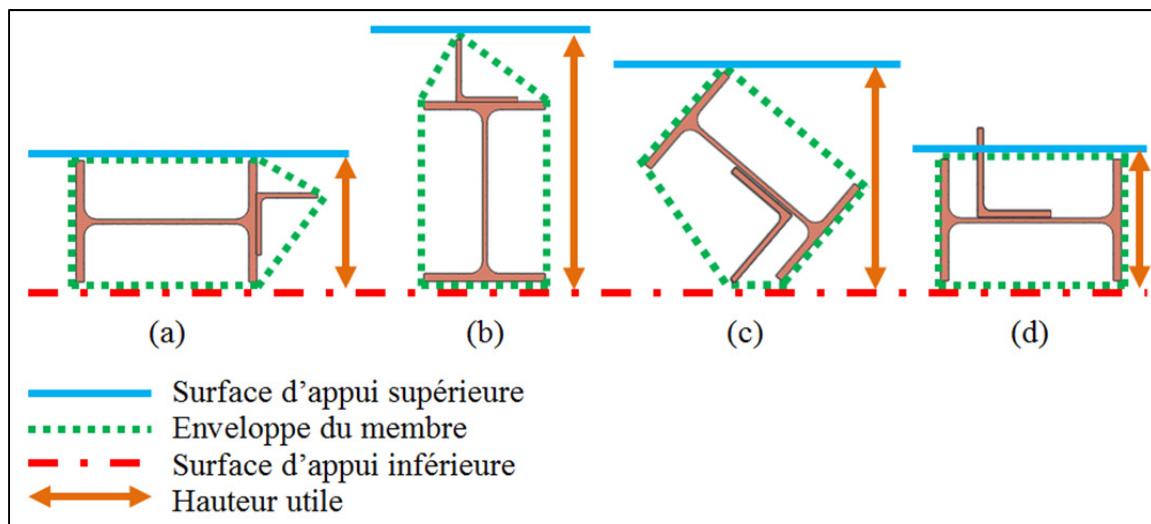


Figure 5.14 Surfaces d'appui et hauteur utile

#### 5.1.2.4 Hauteur utile

Hauteur utilisée par le membre lorsqu'il est placé sur la semi-remorque. Il s'agit donc de la mesure de l'espace entre la surface d'appui inférieure et la surface d'appui supérieure. Le concept est illustré à la Figure 5.14.

#### 5.1.2.5 Tranche

Groupement de membres ayant une somme des largeurs des membres la constituant ayant au maximum 1 pi. de différence avec la largeur de la semi-remorque. Même si la loi permet jusqu'à 8,5 pi. en largeur, les remorques ont généralement 8 pi. en largeur. Ainsi, si la somme des largeurs des membres a au moins 7 pi., on peut considérer le groupe comme un tranche. Une tranche ne couvre pas nécessairement toute la longueur de la remorque, ainsi plusieurs tranches placées bout à bout peuvent former un étage. Une tranche est illustrée à la Figure 5.15.



Figure 5.15 Une tranche dont les membres sont un peu espacés

#### 5.1.2.6 Paquet

Groupement de membres n'ayant pas une largeur suffisante pour être considérée comme une tranche. Il peut également s'agir d'un ensemble de membres préattachés ensemble de façon à ce qu'ils soient solidaires avant même d'être chargés sur la remorque. L'exemple illustré à la Figure 5.16 peut être considéré comme deux paquets empilés l'un sur l'autre si les membres ne sont pas attachés entre-eux, alors que s'ils sont attachés entre-eux et solidaires, il seront considérés comme un seul et même paquet.



Figure 5.16 Deux paquets empilés l'un sur l'autre

### 5.1.2.7 Étage

Pour chaque tranche ou paquet, l'étage exprime la position en hauteur relative aux autres tranches ou paquets sur la semi-remorque. Les tranches ou paquets du premier étage sont placés sur les cales qui touchent à la semi-remorque, et les étages suivants sont empilés successivement par-dessus le dernier étage placé. Ainsi, sur la Figure 5.16, le paquet formé du membre vert et du membre caché est situé à l'étage 1, alors que le paquet formé des membres bleu et rouge est à l'étage 2. Les étages pourront donc servir à identifier l'ordre de chargement des tranches ou paquets.

### 5.1.2.8 Orientation

L'orientation d'un membre détermine laquelle des surfaces de l'enveloppe du membre est choisie comme surface d'appui inférieure et par déduction laquelle est choisie comme supérieure.

### 5.1.2.9 Sens

Le sens d'un membre détermine quelle extrémité du membre sera vers le tracteur. Ainsi, il n'y a que deux sens possibles pour les membres. Si on inverse le sens d'un membre, on lui fait faire une rotation de 180 degrés de sorte que l'extrémité qui pointait vers le tracteur se retrouve à pointer vers l'arrière de la semi-remorque, et vice-versa.

### 5.1.2.10 Boîte englobante

Pour une pièce secondaire, la boîte englobante est une extrusion perpendiculaire à la surface sur laquelle la pièce secondaire est fixée, ayant la forme de la projection de la pièce sur cette surface. Les boîtes englobantes sont toujours convexes et servent à simplifier la géométrie des pièces secondaires. Le trajet droit le plus court sera donc utilisé pour compléter les sections concaves de la pièce secondaire à englober. Cette simplification a pour but de rendre plus faciles les étapes de placement qui doivent assurer qu'il n'y ait pas de collisions entre les

pièces secondaires des différents membres. Une distinction est faite entre l'intérieur et l'extérieur de l'enveloppe du membre afin de déterminer le niveau d'impact sur les membres des étages inférieurs et supérieurs et sur les côtés.

#### **5.1.2.10.1 Boîte englobante interne**

Cette boîte englobante ne concerne que la partie de la pièce secondaire qui se retrouve à l'intérieur de l'enveloppe du membre. Ainsi, les cales ne peuvent jamais entrer en contact avec les boîtes englobantes internes d'un membre, sauf dans certaines exceptions. Des boîtes englobantes internes sont illustrées en couleurs bleu foncé, brun et violet à la Figure 5.17, sur laquelle l'enveloppe du membre (non illustrée) correspond à ses surfaces de référence.

#### **5.1.2.10.2 Boîte englobante externe**

Cette boîte englobante ne concerne que la partie de la pièce secondaire qui se retrouve à l'extérieur de l'enveloppe du membre. Des boîtes englobantes externes sont illustrées en couleurs bleu pâle, orange et rose à la Figure 5.17. Ainsi, les boîtes englobantes externes peuvent causer des interférences avec les cales, qu'il faudra tailler si nécessaire.

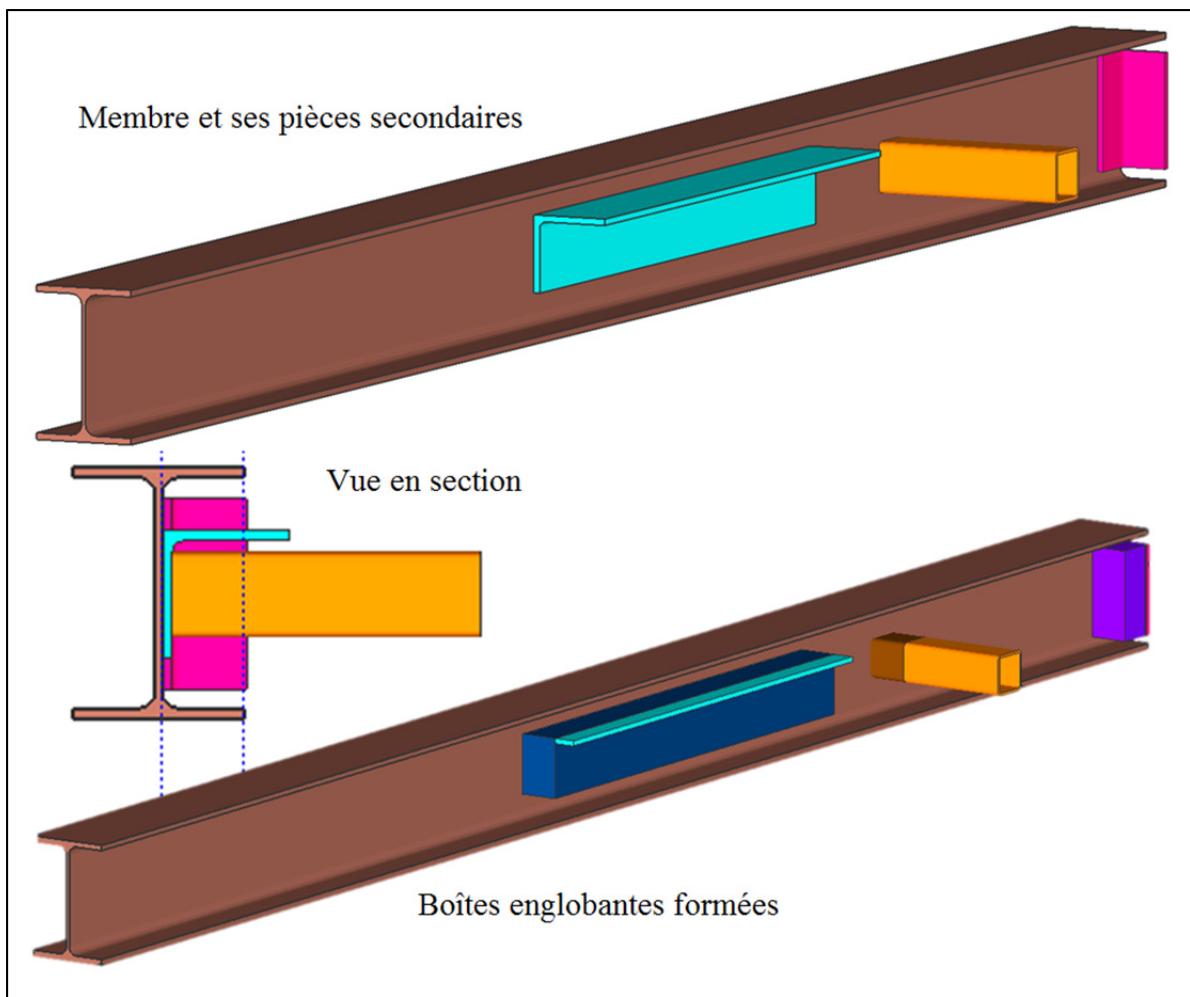


Figure 5.17 Boîtes englobantes internes (en foncé) et externes (en pâle)

## 5.2 Principes de chargement

Les principes de chargement qui ont été déduits de l'observation en usine et des entrevues de préposés au chargement sont décrits dans cette section. Ils sont divisés en cinq catégories, soit les principes qui touchent l'espace exploitable, la masse et la répartition de la masse, le placement des membres, les cales, les priorités et la préparation. Bien que certains de ces principes soient simples, évidents et intuitifs, d'autres sont plus complexes. Il y a aussi des points où les préposés n'étaient pas tous en accord, ainsi certains éléments présentent des principes contradictoires. Pour chaque principe, un code est d'abord donné. Il s'agit soit du nombre de candidats qui ont énoncé ce principe spécifiquement ou qui l'ont confirmé

pendant les entrevues, soit du nombre de candidats chez qui nous avons observé ce principe, sans ne qu'il soit spécifiquement cité. Par exemple, le code 2C3O signifiera : Cité par deux candidats, observé chez les trois autres. 1C1O signifiera : Cité par un, observé chez un autre. Le total ne dépassera donc jamais le nombre total de candidats, soit cinq. Ces principes concernent les chargements réguliers, qui ne nécessitent aucun permis spécial excepté le droit de conduire un tracteur semi-remorque. Certaines dérogations aux règlements peuvent être obtenues pour des transports spéciaux pour lesquels il ne serait pas possible de respecter la réglementation, par exemple lorsqu'un seul membre est plus large que la semi-remorque. Ces exceptions ne sont pas considérées dans les principes énoncés ci-dessous.

### 5.2.1 Espace exploitable

**Principe 01** 5C Le chauffeur qui assurera le transport a toujours le dernier mot sur tous les éléments du chargement. Il peut demander aux préposés de modifier leur chargement pour des raisons de masse, de répartition de masse, d'espace exploitable non respecté, d'orientation des membres, de stabilité douteuse, etc. Si le chauffeur n'est pas à l'aise avec un élément, il peut refuser d'effectuer le transport du chargement.

**Principe 02** 5O Le chargement ne doit jamais dépasser les côtés de la remorque.

**Principe 03** 3C2O Le chargement ne peut pas dépasser à l'arrière lorsqu'il s'agit d'une remorque de 53 pi.

**Principe 04** 1C2O Le chargement peut dépasser d'un mètre à l'arrière lorsqu'il s'agit d'une remorque de 48 pi., par contre ce dépassement doit être uniforme et dépend du chauffeur. C'est le chauffeur qui indique aux préposés s'ils peuvent dépasser ou non.

**Principe 05** 3C Les tracteurs étant différents, on peut parfois dépasser à l'avant d'environ 1 à 3 pi., et parfois on peut dépasser un peu plus dans le centre de la remorque, afin que rien n'entre en contact avec le tracteur dans les virages. Ce principe dépend aussi du chauffeur ainsi que de la façon dont est configurée la sellette du tracteur.

### 5.2.2 Masse et répartition de la masse

**Principe 06** 5C Le masse du chargement doit être bien répartie. Cependant, la répartition de la masse peut être différente pour différentes remorques, alors la question de la manière dont la répartition est assurée demeure ouverte. Les candidats ont énoncé plusieurs pratiques différentes variant selon la situation, indiquées par le Principe 07, le Principe 08 et le Principe 09. Le minimum à respecter reste la réglementation, qui peut imposer une limite de différence de masse entre les essieux selon le pays, la province ou l'état où circulera le tracteur semi-remorque.

**Principe 07** 5C Certains préposés ont tendance à concentrer la masse sur l'avant et l'arrière, afin qu'elle soit répartie parmi les essieux du tracteur et de la semi-remorque.

**Principe 08** 1C Certains préposés ont plutôt tendance à s'assurer que la courbe de certaines semi-remorques soit aplatie en plaçant plutôt la masse vers le centre.

**Principe 09** 2C L'hiver, certains chauffeurs préfèrent avoir une masse placée un peu plus vers l'avant de la semi-remorque, afin d'assurer une bonne traction au tracteur.

**Principe 10** 2C On doit garder le centre de gravité le plus bas possible. Ce principe permet de réduire le risque que le chargement renverse pendant que le véhicule tourne, par exemple.

**Principe 11** 2C L'hiver, les membres peuvent être exposés à de la neige ou de la glace, ce qui peut rendre le chargement plus lourd puisqu'il peut être difficile de retirer la neige ou la glace. Il faut donc conserver une marge de sécurité pour ce phénomène.

### 5.2.3 Placement des membres

**Principe 12** 1C4O Les membres sont toujours placés dans le sens de la longueur sur la remorque, c'est-à-dire que la dimension la plus grande d'un membre est dans le même sens que la longueur de la remorque. Les membres sont donc toujours placés longitudinalement sur la remorque.

**Principe 13** 2C2O On tente généralement de placer les membres couchés. Si on décide de placer des membres debout, on doit s'assurer qu'ils sont bien stables et que d'autres membres ou des cales les empêcheront de verser.

**Principe 14** 4C1O Généralement, les préposés au chargement tentent de garder des étages uniformes en hauteur sur toute la longueur de la remorque, surtout lorsqu'ils ne connaissent pas la forme des membres à venir. Ce principe aura probablement moins d'importance pour un algorithme.

**Principe 15** 5O Généralement, on groupe les pièces de la même longueur et de la même hauteur et on les place côté à côté jusqu'à ce qu'on atteigne la largeur de la semi-remorque.

**Principe 16** 3C2O Généralement, les membres placés côté à côté se touchent. Lorsque les membres ne couvrent pas la totalité de la largeur de la semi-remorque, on peut alors les espacer un peu afin de couvrir autant que possible toute la largeur, afin de soutenir les cales aux extrémités et éviter un effet de chargement en porte-à-faux. On bloque parfois les membres en plaçant des cales entre eux afin qu'ils ne puissent pas bouger (ou se serrer) transversalement.

**Principe 17** 1C Si, à un étage, des membres sont très espacés (parce qu'ils comportent des pièces secondaires imposantes ou pour toute autre raison), les cales qui seront placées dessus pourraient se retrouver en pont au-dessus de certains espaces vides. Si des membres viennent à être placés sur la zone de pont, les cales pourraient casser, alors il faut

soit ajouter du support sous la cale, soit trouver un membre suffisamment large pour que ses appuis soient au-dessus des membres et non sur le pont, tel qu'illustré à la Figure 5.18.

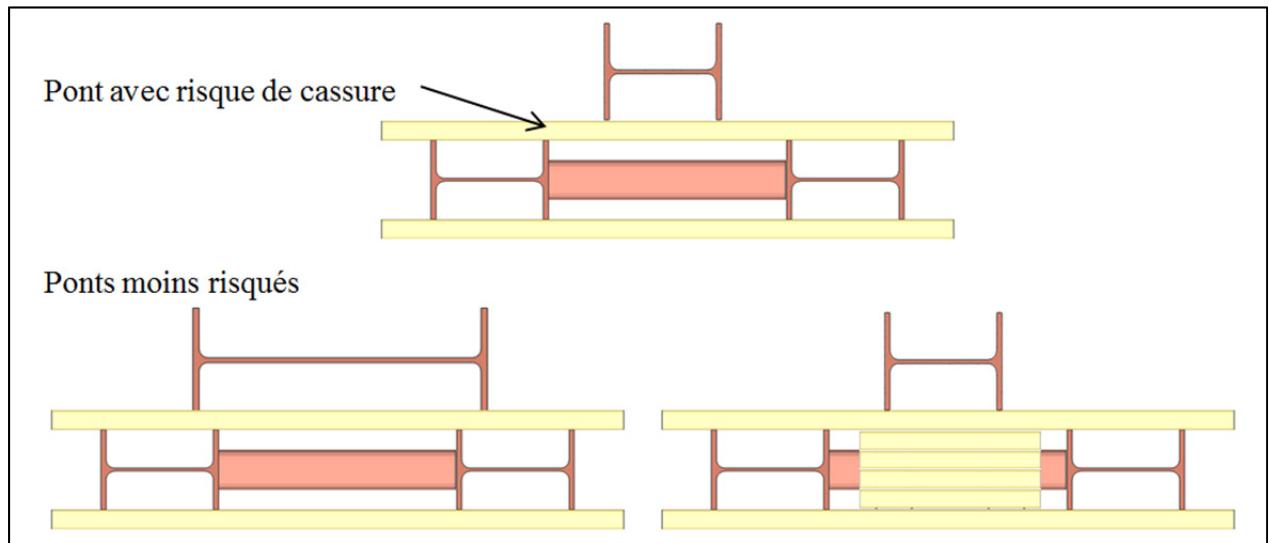


Figure 5.18 Ponts et risques de cassure

**Principe 18** 1C1O Lorsque des membres ont des pièces secondaires sur une semelle seulement d'un côté, on évite généralement de placer ces pièces du côté extérieur de la semi-remorque, afin de garder les semelles le plus près possible de l'extrémité extérieur pour mieux soutenir les cales. Sur la Figure 5.19, le membre surligné en rouge, soit celui en bas à gauche de l'image, n'a pas été positionné dans le bon sens (ou dans la bonne orientation), puisque sa pièce secondaire fait en sorte que sa cale supérieure n'est pas supportée à l'extrémité gauche. Elle pourrait donc casser sous le poids des étages supérieurs. Ce principe ne s'applique cependant pas au dernier étage, puisqu'en plaçant les pièces secondaires vers l'extérieur on permet aux sangles de terminer en angle.

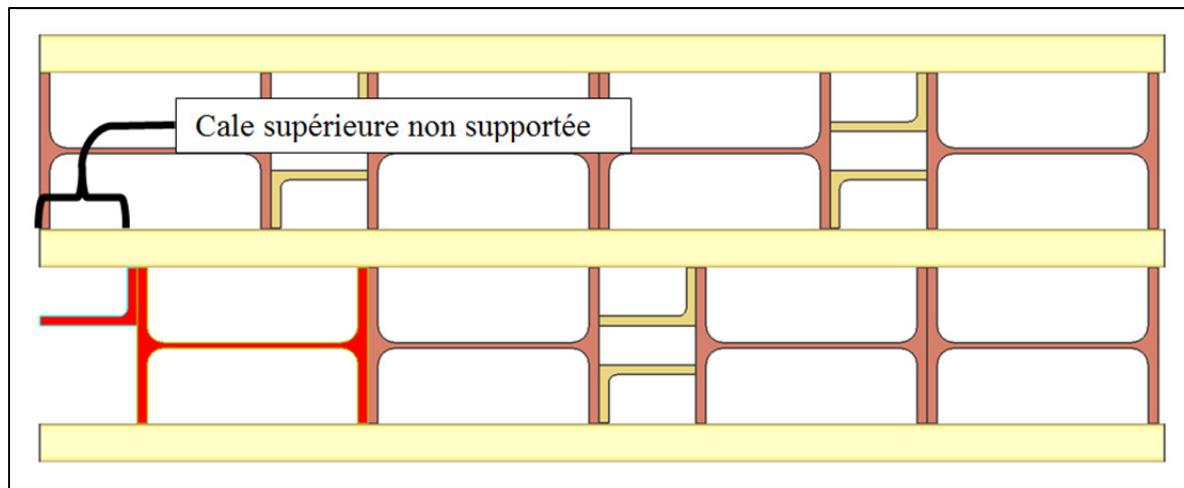


Figure 5.19 Exemple de membre dans le mauvais sens (rouge)

**Principe 19** 2C1O On centre le dernier étage afin de terminer de façon à ce que les sangles d'attache le serrent avec un angle égal des deux côtés.

**Principe 20** 4C Généralement, on évite de placer un membre fer à fer sur un autre. Certains contrats ou clients peuvent l'interdire totalement. Par contre, lorsque c'est permis, on intercale parfois des membres fer à fer afin de compenser pour un manque de hauteur. Ces membres doivent comporter des pièces secondaires qui feront en sorte que les membres ne pourront pas être éjectés en glissant, sinon il faut les bloquer. Généralement, lorsque trois membres ou plus sont intercalés entre eux, on les attache avec des sangles de métal afin d'éviter que l'un ou plusieurs d'entre eux glissent.

**Principe 21** 4C Lorsque le fini de la peinture est très important pour le client, soit on évite que les membres se touchent, soit on place des feuilles de mousse d'environ 0,25 po. d'épaisseur entre chaque membre et autour des cales.

**Principe 22** 5C À l'exception des cas où un chantier comporte plusieurs zones de déchargement, les préposés au chargement ne se préoccupent pas de la façon dont le chargement sera déchargé ou dans quel ordre les membres d'un seul chargement sont nécessaires sur le chantier.

**Principe 23** 1C2O On favorise le placement des plus petits membres à l'avant de la semi-remorque. L'espace arrière (près des essieux) a tendance à « brasser » plus qu'à l'avant. Ainsi, en plaçant les petites pièces à l'avant, le risque qu'elles se détachent ou qu'elles soient éjectées est moindre.

**Principe 24** 2C Selon la répartition de la longueur des membres, on peut décider de placer les plus longs sur le dessus afin de stabiliser le chargement, à condition d'avoir un chargement qui a été monté de sorte que le dernier étage soit d'une hauteur uniforme. Cette situation se présente surtout lorsque les plus longs membres ne sont pas suffisamment longs pour couvrir toute la longueur de la remorque, et que l'espace restant est trop court pour y placer d'autres membres. Elle se présente également lorsque les plus longs membres ne sont pas en quantité suffisante pour faire une tranche complète.

#### 5.2.4 Cales

**Principe 25** 5O Il y a toujours des cales de bois entre la surface de la remorque et le premier étage du chargement.

**Principe 26** 1C4O On tente autant que possible d'enligner les cales verticalement d'un étage à l'autre afin d'assurer que les membres ne subiront aucune force qui pourrait les déformer.

**Principe 27** 1C4O Les membres doivent tous être en contact avec les cales qui les séparent de l'étage inférieur et supérieur. Si les membres d'un étage n'ont pas tous la même hauteur utile, alors il faut adapter les cales afin qu'elles touchent à tous les membres de l'étage, de façon à assurer que tous les membres soient uniformément serrés et qu'aucun d'entre eux n'aura la possibilité de glisser lors d'un freinage, par exemple.

**Principe 28** 5O Généralement, on préfère que l'enveloppe du membre soit celle correspondant aux surfaces de référence, et qu'ainsi les cales soient toutes appuyées sur la pièce principale. Lorsque les membres comportent plusieurs pièces secondaires qui dépassent

de l'enveloppe du membre, on doit alors s'assurer qu'elles s'intercaleront sans contact avec les étages inférieurs et supérieurs et que des espaces libres d'obstacles soient disponibles pour placer les cales. En dernier recours on tente de modifier les cales afin de s'adapter aux pièces secondaires interférant avec leur placement.

**Principe 29** 2C Il peut être judicieux de placer une cale vis-à-vis chaque essieux et une vis-à-vis le pivot d'attelage afin de s'assurer que le poids du chargement repose sur ces éléments. Ce principe repose cependant sur une seule des quelques situations possibles illustrées par le Principe 06.

**Principe 30** 3C Le poids total des cales dans un chargement n'est pas négligeable. Bien qu'il soit difficile d'estimer à l'heure actuelle le poids total des cales dans un chargement, puisque la quantité de cales utilisées peut varier énormément, les préposés gardent toujours une marge de sécurité pour inclure le poids des cales. Cette marge peut également varier selon le climat, les cales humides ou gelées étant plus lourdes.

**Principe 31** 3C1O Certains préposés préfèrent créer des boîtes plutôt que d'empiler plusieurs cales directement une sur l'autre, puisque la boîte est plus stable.

**Principe 32** 5O Toutes les constructions formées de plusieurs cales de bois sont clouées ou vissées afin que la construction soit stable.

### 5.2.5 Priorités

**Principe 33** 3C2O Généralement, on priorise les colonnes aux poutres. Le principe est que pour construire un bâtiment, il faut d'abord avoir les colonnes, qui supportent les poutres. Donc, si le choix doit être fait entre une poutre ou une colonne, la colonne aura priorité sur le chargement.

**Principe 34** 1C2O On tente généralement de distribuer les membres complexes sur plusieurs chargements afin de ne pas se retrouver avec un chargement constitué majoritairement de membres complexes.

### 5.2.6 Préparation

**Principe 35** 2C1O Parfois, on prépare des paquets (préattachés ou non) afin qu'ils soient plus rapides et plus faciles à charger. Ces paquets sont souvent assemblés de membres similaires ou de petits membres. La Figure 5.20 montre un exemple de paquets formés de petits membres préattachés avec des sangles de métal afin d'accélérer le chargement.

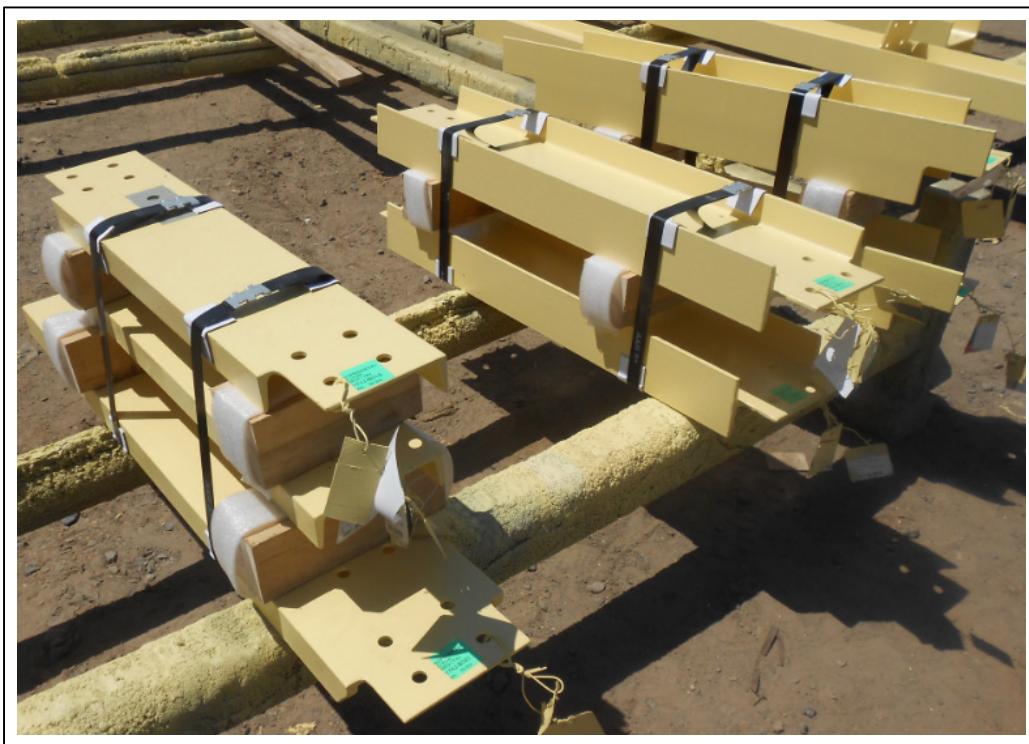


Figure 5.20 Exemple de paquets préattachés

### **5.3 Validation des principes de chargement**

Les candidats ayant tous accepté d'être recontactés pour une seconde activité, nous en avons contacté deux, provenant de deux compagnies différentes, afin de valider les principes de chargements énoncés à la section précédente. À chacun de ces candidats, nous avons lu chaque principe de la section 5.2 et leur avons demandé s'ils étaient d'accord ou non. S'ils n'étaient pas d'accord, ils nous indiquaient pourquoi.

À la suite de ces vérifications, quelques modifications, ont été apportées. Par exemple, le Principe 22, mentionnant que les préposés au chargement ne se préoccupent pas de l'ordre de déchargement, a été modifié pour inclure l'exception lorsqu'un grand chantier dispose de plus d'une zone de déchargement. Ainsi, dans ce cas, il faut qu'ils s'assurent de ne pas mélanger les membres allant à des zones de déchargement différentes. Quelques autres précisions ont été apportées à deux autres principes.

### **5.4 Proposition d'une esquisse d'algorithme**

En se basant sur les définitions et les principes énoncés dans les sections précédentes du présent chapitre et en s'inspirant des observations en entreprises et des entrevues avec les préposés, nous avons défini plusieurs étapes qui selon nous seraient à inclure dans un algorithme de placement. Ce dernier sera donc constitué de plusieurs sous-algorithmes. Dans les sections suivantes, une proposition d'algorithme est donnée en expliquant brièvement chacune des étapes qui constituerait des sous-algorithmes. Mais d'abord, voici les données nécessaires à son départ.

#### **5.4.1 Données initiales**

Voici, pour chaque élément, les données qui seront nécessaires au bon déroulement d'un algorithme.

- Remorque :
  - ◊ Espace exploitable;
  - ◊ Dimensions de la plateforme. Ces dimensions doivent pouvoir, par exemple, comporter deux niveaux, pour inclure les semi-remorques « dropdeck »;
  - ◊ Masse maximale du chargement;
  - ◊ Position des essieux;
  - ◊ Position du pivot d'attelage;
  - ◊ Liste des membres disponibles pour ce chargement. Cette liste pourrait être une agrégation des informations nécessaires à chaque membre, présentées ci-dessous.
- Membre :
  - ◊ Numéro de la séquence;
  - ◊ Indice de priorité;
  - ◊ Masse totale;
  - ◊ Position du centre de gravité;
  - ◊ Pièce principale du membre, incluant ses informations présentées au point suivant;
  - ◊ Liste des pièces secondaires attachées au membre, incluant leurs caractéristiques présentées au dernier point.
- Pièce principale :
  - ◊ Type (Poutre, tube, angle, etc.);
  - ◊ Section ou profil;
  - ◊ Longueur;
  - ◊ Autres informations de découpe affectant sa forme.
- Pièces secondaires :
  - ◊ Point de référence;
  - ◊ Type (si applicable);
  - ◊ Section (si applicable);

- ◊ Positionnement par rapport au membre. À cet égard, une convention doit être établie ou adoptée pour établir la position et l'orientation d'un repère pour chaque pièce;
- ◊ Dimensions.

## 5.4.2 Analyse et classification des membres

Pour chaque membre, cette étape effectue une analyse qui permettra de le catégoriser selon plusieurs paramètres utiles aux prochaines étapes. Certains paramètres d'un membre peuvent être calculés à cette étape si l'information n'est pas déjà existante, comme la masse totale ou la position du centre de gravité. Ensuite, l'analyse s'attaque aux pièces secondaires attachées au membre en question.

### 5.4.2.1 Analyse des pièces secondaires d'un membre

Détermine la liste des pièces secondaires attachées au membre et vérifie leur influence sur les étapes subséquentes en les classant selon diverses caractéristiques. Les étapes de cette classification sont expliquées dans les sous-sections suivantes.

#### 5.4.2.1.1 Classement longitudinal / transversal / perpendiculaire

Est-ce que la pièce secondaire est placée longitudinalement, transversalement ou perpendiculairement par rapport à la (ou les) surface sur laquelle elle est fixée? Cette question permet de déterminer quelque peu l'influence des pièces secondaires et comment elles doivent être analysées. Par exemple, les pièces longitudinales peuvent influencer l'enveloppe du membre si elles couvrent la majorité de la longueur du membre. Elles peuvent également influencer le taillage des cales.

#### 5.4.2.1.2 Boîte englobante interne/externe de la pièce secondaire

Création de la zone interne. Il s'agit d'une projection normale sur la surface de la pièce principale. Est-ce que cette pièce secondaire dépasse des surfaces de l'enveloppe du

membre? Si oui, il faut identifier la zone externe également. Il s'agit d'une projection de seulement la partie de la pièce qui dépasse de la surface de l'enveloppe sur cette dernière. Cette zone forme ensuite une boîte englobante de la partie qui dépasse l'enveloppe. Cette boîte englobante a donc quelques paramètres : la forme et les dimensions de la projection 2D sur la surface de l'enveloppe, hauteur de dépassement, sens de la boîte (longitudinale, transversale, perpendiculaire), etc.

#### **5.4.2.1.3 Analyse des boîtes englobantes externes**

Pour chaque boîte englobante externe, on attribue un paramètre selon la manière dont elle influence les étapes subséquentes :

- Situation 1 : La boîte englobante externe ne dépasse pas la hauteur d'une cale de bois. Il est possible de positionner les cales autour de la boîte.
- Situation 2 : La boîte englobante externe ne dépasse pas la hauteur d'une cale de bois, cependant il n'est pas possible de positionner les cales autour de la boîte. Il faut donc tailler une ou plusieurs cales. Par exemple, une pièce placée longitudinalement couvre la majeure partie de la longueur du membre.
- Situation 3 : La boîte englobante externe dépasse de la hauteur d'une cale de bois, mais pas de deux. Il est possible de positionner les cales autour de la boîte.
- Situation 4 : La boîte englobante externe dépasse largement (au-delà de deux cales).
- Situation 5 : La boîte englobante modifie l'enveloppe du membre, sachant que l'enveloppe la plus simple d'un membre correspond aux surfaces de référence.

#### **5.4.2.2 Analyse des surfaces du membre**

Afin de trouver l'orientation du membre qui offre la meilleure stabilité, une analyse est effectuée sur chaque paire de surface d'appui inférieure et supérieure.

Tout d'abord, on détermine les couples surface-surface ou surface-arrête possibles. Ainsi, pour chaque surface de l'enveloppe du membre, on détermine l'autre surface ou l'arête de l'enveloppe la plus éloignée et parallèle, tel qu'illustré à la Figure 5.14 de la page 109.

Pour chaque couple, un score est attribué selon les paramètres suivants :

- Stabilité de la surface (rapport largeur/hauteur de la section du membre, ou de l'aire de la surface inférieure). Pour ce critère, sur la Figure 5.14 (page 109), les exemples (a) et (d) auraient les meilleurs scores, alors que (c) aurait le plus faible, puisque cette surface est probablement instable.
- Quantité d'éléments perturbateurs (pièces secondaires) et leurs impacts. Pour ce critère, sur la Figure 5.14 (page 109), l'exemple (d) aurait un score plus faible étant donné qu'on doit scier les cales de la surface d'appui supérieure si elles ne peuvent pas être placées autour de l'élément perturbateur. Plus il y a de pièces secondaires ayant une boîte englobante externe, plus le score est faible.

Ce système élimine donc les placements improbables ou non-pratiques (tel que l'exemple (c) de la Figure 5.14), puis établit une orientation à favoriser pour chaque membre ainsi que d'autres possibilités. Par exemple, (a) serait à favoriser alors que (b) pourrait être une option pour le même membre. Également, (d) serait mieux que (c) même si l'enveloppe de (d) était la même que (c).

### 5.4.3 Groupement des membres

Cette étape tente de grouper les membres en tranches. Avant d'effectuer le groupement, plusieurs étapes sont nécessaires.

#### 5.4.3.1 Séparation en groupes

Plusieurs groupes regroupant des membres aux caractéristiques similaires doivent être formés. Les deux principales caractéristiques sont la longueur et la hauteur utile.

#### 5.4.3.1.1 Longueur

Pour l'ensemble des membres à placer, on les sépare par groupes de longueur, avec une tolérance de quelques pieds (2-5) selon l'homogénéité du groupe. On catégorise selon quelques catégories principales, selon le type de remorque : Très longues ( $>27$  pi., on ne peut pas en placer deux bout à bout), longues (17 à 27 pi., on peut en placer deux bout à bout), moyennes (13 à 17 pi., on peut en placer 3 bout à bout), courtes (7 à 13 pi., on peut en placer 4 ou plus bout à bout) et très courtes (6 pi. et moins). Cette catégorisation est inspirée de la façon dont semblaient fonctionner plusieurs préposés passés en entrevue. Ils tentaient généralement de placer la combinaison de longueurs qui couvrait au maximum la longueur de la remorque en premier.

#### 5.4.3.1.2 Hauteur utile

On sépare ensuite les membres par hauteur utile. Notons que certains membres peuvent appartenir à plusieurs groupes si de multiples orientations sont possibles. Il peut aussi y avoir deux fois le même membre dans le même groupe, avec une orientation différente. Par exemple, le membre (a) de la Figure 5.14 (page 109) pourrait appartenir deux fois au même groupe si on inverse les surfaces d'appui.

#### 5.4.3.2 Formation de tranches

Parmi les membres appartenant aux mêmes groupes, on tente de former des tranches. La formation de tranches consiste à placer côté à côté des membres faisant partie des mêmes groupes. Ainsi, on tente de maximiser la largeur jusqu'au maximum imposé par la semi-remorque (généralement 8 pi.). Il faut prendre en considération que certaines pièces secondaires peuvent s'intercaler, ainsi la largeur d'une tranche n'est pas nécessairement la somme des largeurs totale des membres. Il faut soustraire les sections des pièces secondaires latérales qui s'intercaleront. Si on considère au départ que les hauteurs utiles sont les mêmes, alors le problème de création de tranches devient 2D. Les pièces seront séparées latéralement par la boîte englobante externe latérale qui a la plus grande dimension, tel qu'illustré à la

Figure 5.21. À chaque membre ajouté à la tranche, on vérifie s'il n'y a pas de collisions parmi les boîtes englobantes. Si des collisions ont lieu, une procédure de placement peut être invoquée. Elle tentera de déplacer longitudinalement le membre ajouté jusqu'à ce qu'une position valide soit trouvée. Également, si un membre comporte plusieurs orientations dans le même groupe, les versions correspondant aux autres orientations ne peuvent pas être choisies pour la même tranche, excepté si plusieurs articles correspondant au même membre existent réellement.

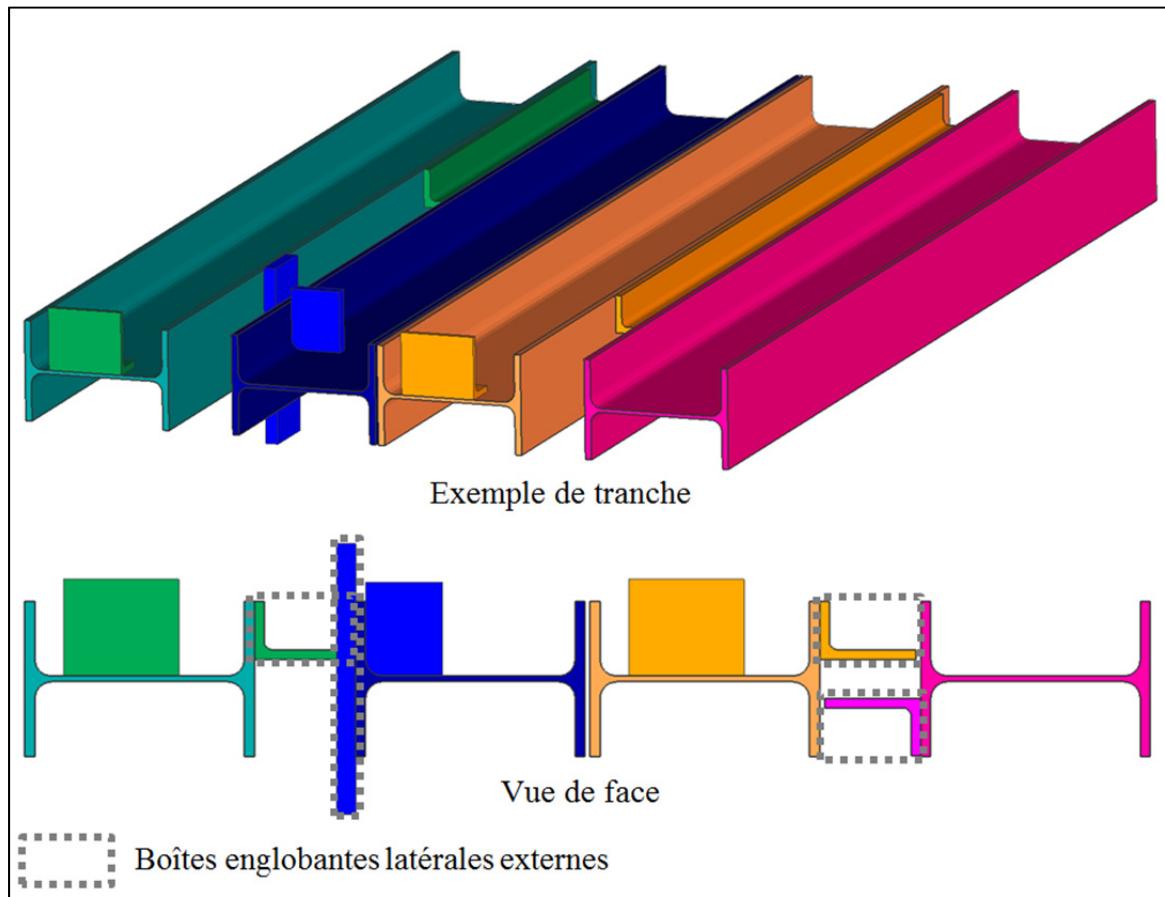


Figure 5.21 Membres formant une tranche

Pour les tranches incomplètes (nommées paquets), on vérifie si on peut regrouper plusieurs paquets ensemble. Par exemple, pour une tranche ayant une longueur de 25 pi., des membres plus courts et ayant une même hauteur utile pourraient être placés bout-à-bout afin de compléter la tranche, tel qu'illustiqué à la Figure 5.22. Un autre exemple serait de prendre deux

paquets aux hauteurs utiles différentes en considérant qu'il faudra placer une épaisseur de cales supplémentaire vis-à-vis l'un de ces paquets, ou encore empiler plusieurs paquets afin d'égaler l'épaisseur du paquet le plus épais. Sur l'exemple de la Figure 5.22, si les membres noirs (ceux du haut) avaient une hauteur utile beaucoup plus haute que les autres membres, on pourrait alors faire deux étages avec les membres blancs (en bas à gauche) et rouges (en bas à droite). Des combinaisons de paquets peuvent ainsi être faites afin de compléter des tranches, et ce même sur plusieurs étages.



Figure 5.22 Paquets formant une tranche

Un très grand nombre de possibilités peut être généré à cette étape. Un même membre peut à cette étape se retrouver dans plusieurs paquets ou tranches différentes. Le but est de couvrir un très grand nombre de possibilités. Plus il y a d'alternatives explorées, plus il est probable qu'une solution optimale soit trouvée.

#### 5.4.3.3 Analyse des tranches

Chaque tranche formée constitue un nouvel ensemble. Afin de simplifier les étapes subséquentes, on crée alors une nouvelle entité dont les caractéristiques sont extraites des membres formant la tranche.

### 5.4.3.3.1 Unification

Une fois les tranches et paquets complétés, on les considère chacun comme un élément unique de chargement. Une enveloppe globale est créée unifiant les enveloppes des membres, tel qu'illustré à la Figure 5.23. Les boîtes englobantes internes et externes sont également transférées, conservées intactes. Les tranches placées ensuite doivent donc l'être en s'assurant que les boîtes englobantes des deux tranches n'entrent pas en conflit.

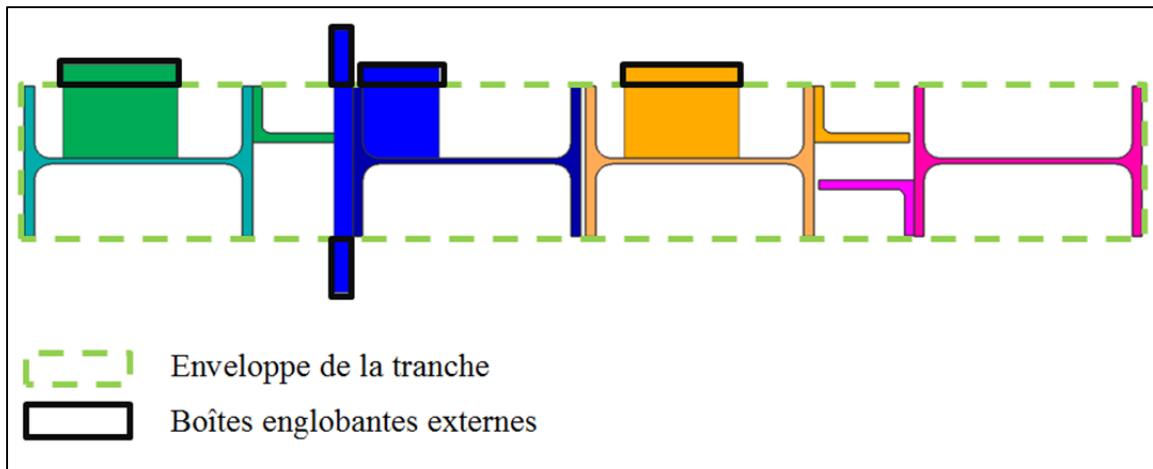


Figure 5.23 Unification de l'enveloppe des membres pour une tranche

### 5.4.3.3.2 Zones de placement des cales

Une analyse est effectuée pour déterminer les zones où il est possible de placer des cales. Essentiellement, ces zones seront les endroits où, sur toute la largeur de la tranche, il n'y a pas de boîte englobante externe. Des zones peuvent également identifier les endroits où il est possible de placer des cales, à condition de les sculpter pour éviter certaines boîtes englobantes externes avec une hauteur inférieure à une cale. La Figure 5.24 illustre ces zones pour l'exemple de tranche de la Figure 5.21.

Les cales sont utilisées afin de stabiliser le chargement. Il faut donc en placer suffisamment pour que les membres déposés sur les étages subséquents soient stables à chaque étape du

chargement. Il faut donc accorder une grande importance aux cales puisqu'elles jouent un rôle important dans la stabilité du chargement.

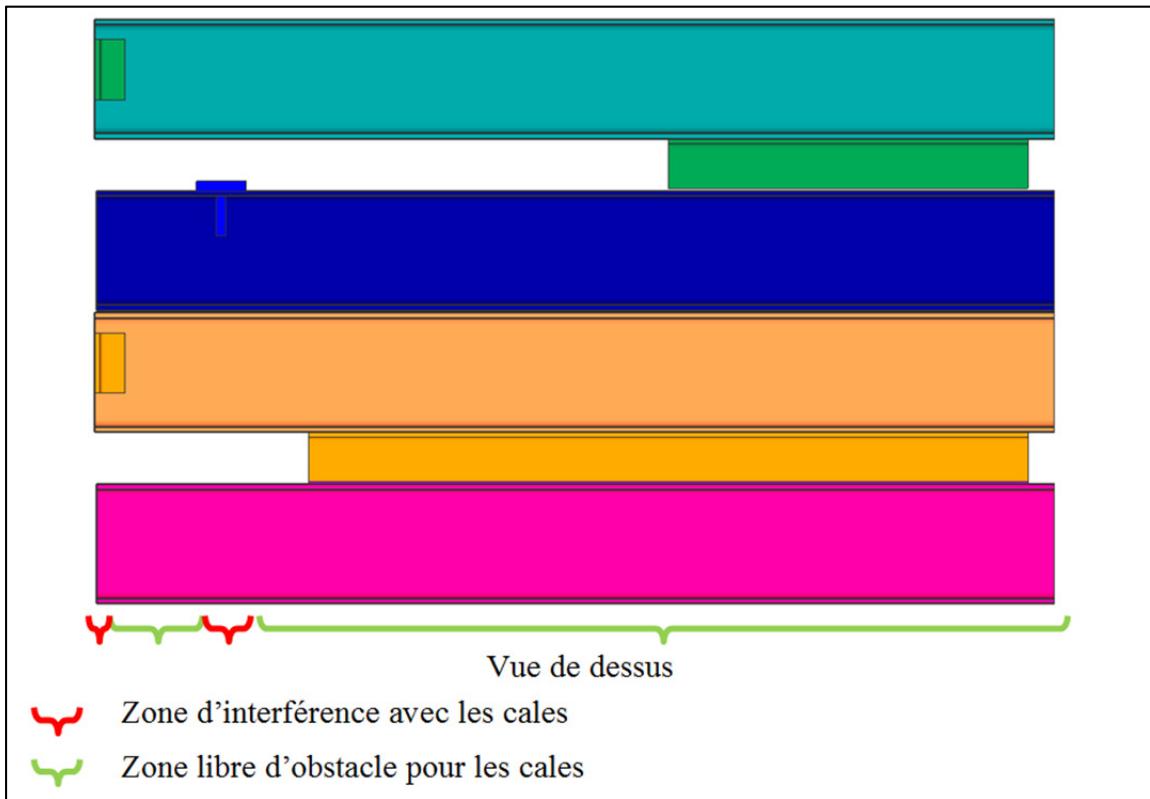


Figure 5.24 Zones de placement des cales

#### 5.4.4 Placement des tranches et paquets

Les tranches sont classées par hauteur utile. On tente ensuite d'associer les tranches de différentes longueurs afin de couvrir toute la longueur de l'espace exploitable (avec un jeu de quelques pieds), donc on essaie de maximiser la longueur totale de tranches placées bout à bout. Les groupes formés qui réussissent à répondre à ces critères forment des étages.

#### 5.4.5 Conclusion partielle

Bien que cette esquisse d'algorithme ne soit qu'un résumé des idées colligées pendant ce projet, elle dessine tout de même l'ampleur qu'auront l'algorithme et les étapes nécessaires à

son développement. Un algorithme permettant de générer automatiquement des patrons de chargement de structure d'acier sur camions pourrait selon nous être développé en suivant et adaptant cette esquisse qui se base sur la méthode utilisée par les préposés au chargement.

## CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif principal de ce projet était de déterminer les paramètres permettant de créer un algorithme capable de proposer automatiquement des patrons de chargement pour de la charpente d'acier en vue de leur transport par semi-remorques. Cet objectif a été décomposé en trois objectifs spécifiques, soit de cerner l'état actuel de la connaissance pertinente au projet, rendre explicites les connaissances du domaine du chargement de membres d'acier et de proposer une esquisse d'algorithme de préparation de patrons de chargement.

Le premier objectif spécifique a été atteint par la revue de la littérature réalisée, ce qui a permis de cerner les aspects nécessaires à ce projet pour cinq thèmes principaux. Nous avons cerné les termes relatifs à la charpente d'acier et au transport routier en plus de comprendre la réglementation Nord-Américaine qui en affecte le transport. Nous nous sommes ensuite familiarisés avec les formats de fichiers numériques existants et avons recommandé l'IFC comme étant le plus adéquat pour alimenter un algorithme. Nous nous sommes familiarisés avec la fabrication additive et l'avons utilisée pour fabriquer un ensemble de membres au format réduit pour interviewer des préposés au chargement. Finalement, nous avons vérifié l'état de l'art dans la littérature et avons classé ce projet selon la typologie de Wäscher, Haußner et Schumann (2007). En étant toujours classé comme étant tridimensionnel et irrégulier, ce problème de chargement peut se classer dans cinq catégories raffinées selon la façon de l'aborder, soit SSBPP, MBSBPP, SKP, MIKP ou MHKP. De plus, nous avons vérifié si des algorithmes existants pourraient être utiles et avons trouvé un article dont le problème peut se comparer au nôtre, soit celui de Egeblad et al. (2010).

Le second objectif spécifique a été atteint en visitant d'abord quatre entreprises distinctes. Ces visites nous ont permis de comprendre comment fonctionne essentiellement une usine de fabrication d'acier en plus d'observer les différences qui existent au niveau du chargement des membres sur les véhicules de transport. Nous sommes ensuite parvenus à interviewer, dans un contexte contrôlé, cinq préposés au chargement expérimentés provenant de trois entreprises différentes, ce qui nous donne un bon aperçu des différentes façons de raisonner

pour la préparation d'un chargement et des différentes contraintes imposées par différentes compagnies d'acier. Nous avons ensuite explicité les connaissances en documentant les éléments cernés dans le cadre des deux premiers objectifs spécifiques. Nous avons défini plus de 30 termes unifiés pour le projet qui proviennent des cinq thèmes principaux. Nous avons ensuite défini 35 principes de chargement dont l'expression s'appuie sur le vocabulaire proposé.

Finalement, le troisième objectif spécifique a été atteint car nous sommes également parvenus à dresser une esquisse d'algorithme qui pourra inspirer le développement futur d'un algorithme complet. Cette esquisse dresse les principales étapes de résolution de problème qui devront être complétées afin de parvenir à un algorithme capable de préparer automatiquement les patrons de chargement.

Grâce à ces trois objectifs spécifiques, nous sommes en mesure d'affirmer que les principaux paramètres nécessaires au développement d'un algorithme capable de créer automatiquement des patrons de chargement pour des membres d'acier sont déterminés et documentés.

Cette étude comporte toutefois des limites, qui font que quelques zones d'incertitude persistent. Ces limites offrent toutefois une opportunité d'approfondir les connaissances dans une éventuelle suite à ce projet. En effet, certains principes, par exemple le Principe 06, concernant la répartition de la masse, s'appuie sur les Principes 07 à 09 qui paraissent contradictoires. Une analyse plus minutieuse sera nécessaire pour prioriser ou invalider certains d'entre eux. Un autre élément limitant l'étude serait l'ensemble des membres à échelle réduite utilisé. Bien qu'il soit assez varié et comporte une bonne quantité de pièces, cet ensemble ne contient que des poutres et colonnes en I, alors que les chargements peuvent comporter plusieurs profilés différents.

Quelques recommandations s'imposent donc par rapport aux limites de l'étude. Certaines de ces limites concernent les termes et principes définis dans ce mémoire. Bien que les principes aient été validés par deux préposés au chargement, une étape de validation supplémentaire

serait indiquée pour vérifier que tous les aspects nécessaires au chargement d'une semi-remorque sont couverts. Il pourrait donc être bénéfique, par exemple, de retourner observer des équipes de préposés au chargement chez quelques entreprises et vérifier que chacune de leurs actions peut être liée à un principe documenté. Cette étape de validation permettrait aussi d'identifier des principes qui pourraient avoir été omis dans le cadre du présent mémoire.

Également, certains autres principes pourraient être validés scientifiquement à l'aide de mesures. Par exemple, est-il vrai que la partie avant d'une semi-remorque est plus stable et « brasse » moins que la partie arrière, tel qu'indiqué dans le Principe 23? Ce principe, mentionné par un préposé, pourrait être confirmé ou invalidé en plaçant des capteurs, probablement des accéléromètres, sur différentes parties d'une semi-remorque et de son chargement d'acier à livrer.

D'autres éléments, tel que les cales de bois, sont aussi ouverts à des questions et tests plus rigoureux. Quel type de bois, ou autre matériau, est réellement le plus économique et le plus apte à stabiliser les membres, à les empêcher de glisser et à maintenir une solidité suffisante pour ne pas se déformer ou casser sous la masse du chargement? Cette question soulève également une autre question, soit comment bien définir et assurer la stabilité du chargement? En pratique, le chargement est stabilisé grâce aux cales de bois, l'expérience des préposés dans la préparation du chargement et par les courroies de la semi-remorque qui viennent finalement serrer tout le chargement. Par contre, quelles sont les forces à appliquer et à tester sur les membres et les cales virtuelles d'un patron de chargement afin d'assurer que la stabilité sera maintenue pendant le chargement et le transport? La stabilité occupant un rôle important dans le chargement des membres, il faut identifier une méthode adéquate et sûre pour qu'elle soit assurée à toutes les étapes du chargement. Bref, bien que ce mémoire couvre l'essentiel du problème, des questions plus pointues demeurent ouvertes et seront à explorer dans une suite du projet.

Concernant la démarche à suivre, quelques recommandations s'imposent également pour la suite. D'abord, il sera important de disposer de la collaboration d'au moins une compagnie d'acier prête à se prêter au jeu des essais et erreurs virtuels des premières itérations d'un algorithme. Ces essais de placement virtuels doivent être évalués et validés par un expert avant de pouvoir être testés dans le monde réel. Bien que le processus général du chargement d'acier soit décrit dans ce mémoire et que les principes de base soient généralement les mêmes, chaque entreprise dispose d'une réalité différente et peut avoir des contraintes supplémentaires, par exemple lorsqu'elles n'ont pas de pont roulant. Une entreprise « test » permettra de répondre aux questions qui lui sont spécifiques et pourra aiguiller le développement de l'algorithme et son intégration en entreprise.

Dans ce sens, nous préconisons un développement incrémental de l'algorithme. En effet, il faudra d'abord bien maîtriser les étapes primaires de l'algorithme (génération de tranches, par exemple) avant d'essayer de générer un patron pour le chargement complet. Les entreprises disposant de préposés au chargement expérimentés ou d'ingénieurs qui s'occupent de la planification des chargements pourront évaluer, une à une, chacune des différentes étapes menant à un algorithme complètement automatique. Leurs commentaires et évaluations sont nécessaires pour ajuster adéquatement les différents systèmes de pointage qui doivent être définis dans l'algorithme. Ainsi, le développement d'une ou plusieurs solutions temporaires que les entreprises d'acier peuvent utiliser et expérimenter nous paraît essentiel.

Ces solutions temporaires doivent être intégrées dans un logiciel, qui doit également être développé. Ce logiciel doit permettre aux utilisateurs de visualiser les différentes étapes de l'algorithme, afin qu'elles puissent être évaluées. Par exemple, on doit pouvoir visualiser un ensemble de différentes tranches générées, le pointage que l'algorithme leur attribue, et valider que le meilleur pointage correspond réellement à une tranche plus adéquate que les autres. Il doit également être modulaire afin qu'on puisse y ajouter progressivement les nouvelles étapes de l'algorithme afin qu'elles puissent être testées et évaluées à leur tour. Ainsi, le développement de ce logiciel occupe un rôle important dans le développement de

l'algorithme puisqu'il fera le lien entre ce dernier et l'utilisateur. Cette nécessaire collaboration plaide pour la nécessité d'impliquer au moins une entreprise d'acier.

Par ces différentes recommandations et grâce au progrès présentés dans ce mémoire, nous sommes confiants qu'il sera possible de développer un algorithme complet capable de générer des patrons de chargement pour des membres d'acier. Il est intéressant de noter qu'au niveau scientifique, ce développement constitue un travail pionnier puisque très peu de littérature concerne l'application réelle d'algorithmes de chargement aux membres irréguliers.



## ANNEXE I

### PHOTOS DES MEMBRES MINIATURES FABRIQUÉS



Figure-A I-1 Membres D1 à D10

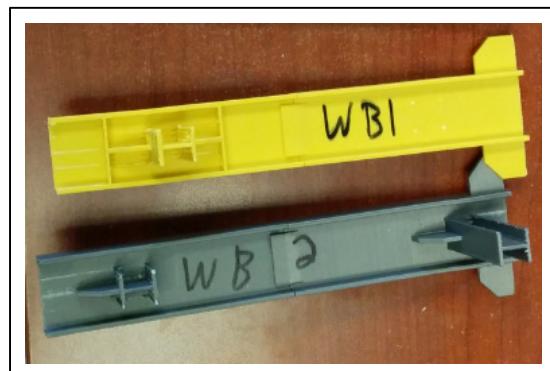


Figure-A I-2 Membres WB1 et WB2

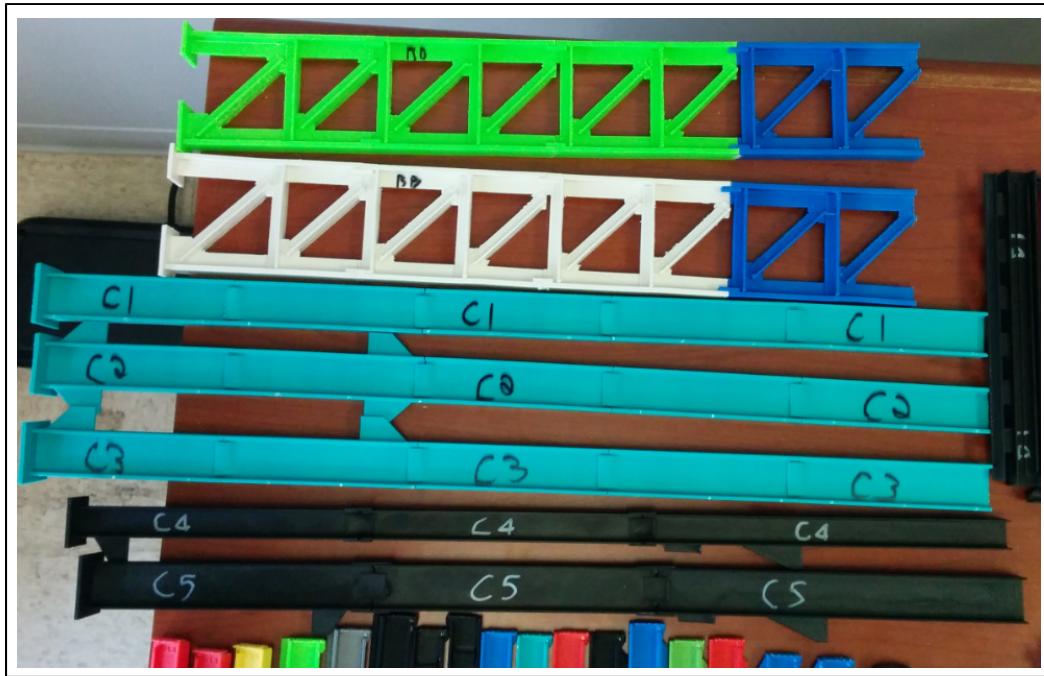


Figure-A I-3 Membres BB et C1 à C5



Figure-A I-4 Membres B1 à B7 (B6 inexistant)



Figure-A I-5 Membres B8 à B11, S1, S2, MB1 et MB2



Figure-A I-6 Membres S3 et MB3 à MB7



## ANNEXE II

### EXEMPLE DE TRANSCRIPTION

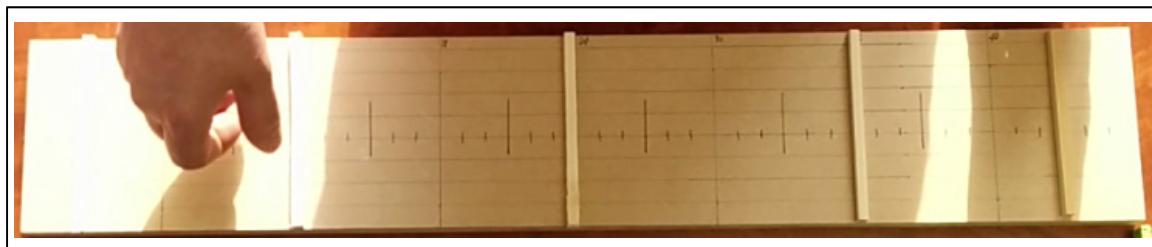


Figure-A II-1 Étape #1

L'avant est à gauche et l'arrière est à droite.

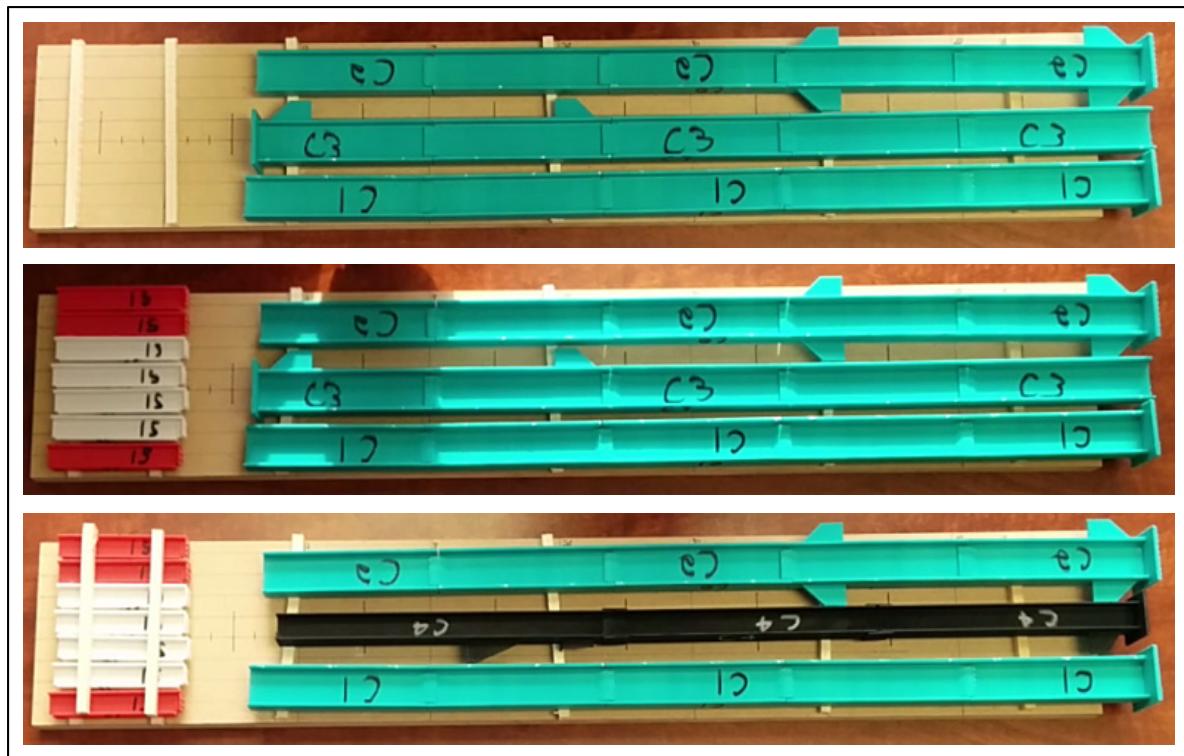


Figure-A II-2 Étapes #2 à #4



Figure-A II-3 Étape #5

Il y a des cales minces courtes sur C1 et C2 afin de compenser la différence de hauteur avec C4. Puis des cales normales par-dessus.

*Des fois on essaye de mettre les pièces... comme ça on appelle ça des colonnes, sur le premier plancher.*

**Y a-t-il une raison particulière? Parce qu'elles sont plus lourdes, plus longues?**

*Oui plus longues on va dire, parce que si tu mets tes plus courts ici (voir image suivante), bin là... ici (L'arrière de la remorque) tu tombes avec un vide. On essaye que ça n'arrive pas trop non plus.*

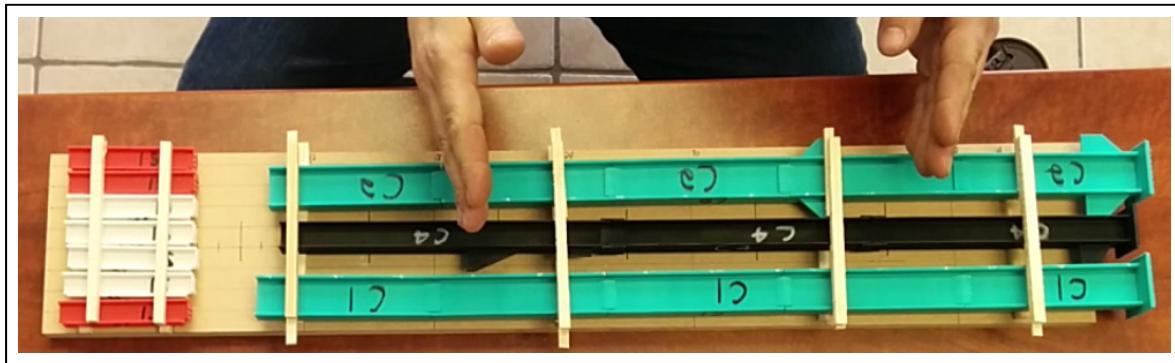


Figure-A II-4 Étape #6

*Le pourquoi des ailes par en dedans, c'est que par dehors tu ne peux pas dépasser et tu viens...*

***Tu perds de l'espace si tu les mets vers l'extérieur?***

*Tu mets toujours ton plus droit vers l'extérieur, parce que regarde ici (C5 sur l'étape #7), t'es sur le bord de ton trailer, tandis que l'autre bord, si tu le mets comme ça (Avec les plaques vers l'extérieur), t'a des trous et dans ce temps-là faut que tu « shime » (place des cales) ici. (Dans l'espace qui se crée entre le bord de la pièce principale et le bord de la remorque.)*

*Elle (D7), je pourrais l'avancer pour la mettre dans le milieu, sauf que j'ai rien ici (dans l'espace vers la gauche, puisque la pièce tomberait un peu plus dans le vide vers la gauche de la remorque, tel que placé dans l'image suivante). Moi j'ai déjà vu du monde qui levaient ça les pièces du dernier étage) et qui pognaient ça (Les cales les plus à gauche appuyées sur les colonnes) pour le tasser (Afin d'appuyer, dans cet exemple, D7 sur la cale la plus à gauche et la laisser centrée par rapport aux pièces C3 et C5)*



Figure-A II-5 Étape #7

*C'est pas mal mieux de se centrer [sur les cales]. C'est sûr qu'ici (à gauche) il reste un trou, sauf que t'a pas terminé ton trailer.*

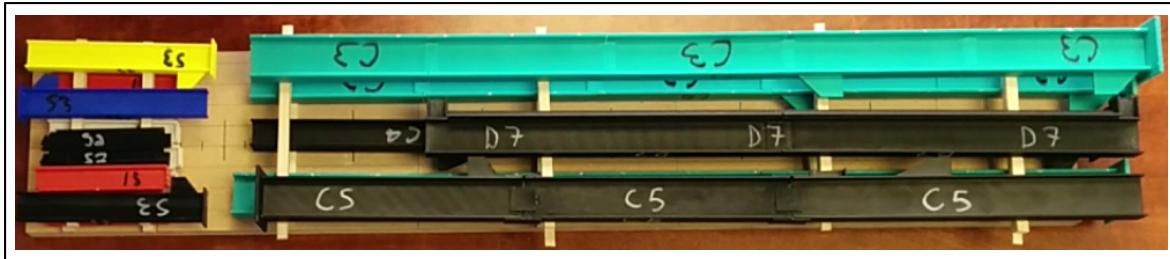


Figure-A II-6 Étape #8

Cales minces placées sur les pièces S2 pour compenser la différence de hauteur avec les pièces voisines.

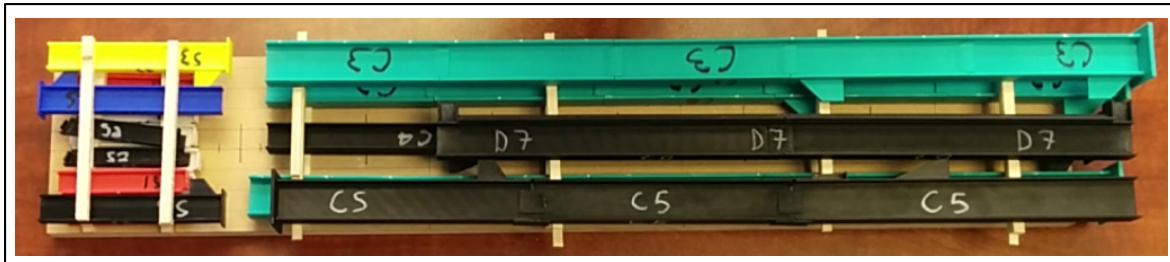


Figure-A II-7 Étape #9

Il y a une cale courte ajoutée par-dessus la cale la plus à gauche sous C3 et C5. Cales : Une cale est appuyée longitudinalement sur l'angle de D7, puis une de C3 à D7 et une de D7 à C5 pour compenser pour la pièce qui dépasse en hauteur de D7. Puis une cale par-dessus le tout.

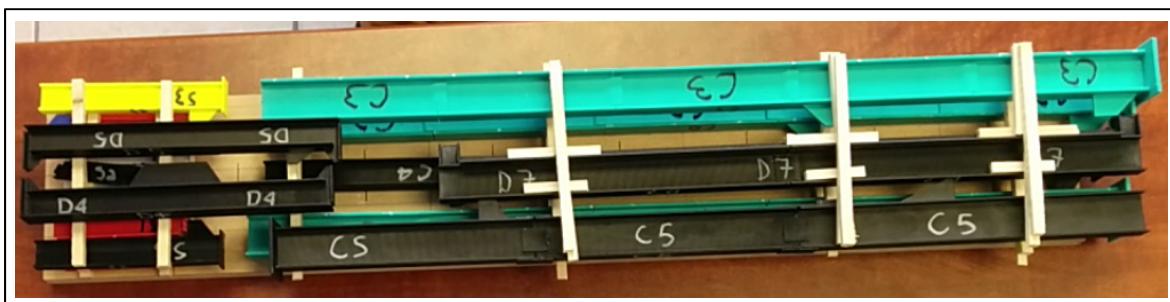


Figure-A II-8 Étape #10

Le candidat mesure une pièce (B11) au-dessus des trois cales de droite, se rend compte que celle de gauche est trop à gauche pour supporter la pièce, alors il la déplace vers la droite.

*Là normalement, mon morceau je l'aurais mis dans les airs ici (Au-dessus des cales), j'aurais pris mon bloc et je l'aurais descendu (Déplacé la cale vers la droite). (Ainsi, le candidat aurait pu savoir exactement où placer la cale.)*



Figure-A II-9 Étapes #11 et #12

La nouvelle cale ajoutée sur l'image ci-dessus est doublée.



Figure-A II-10 Étape #13

Les cales longitudinales à gauche de l'image ci-dessus sont doublées en hauteur.



Figure-A II-11 Étape #14

Les cales de gauche sur l'image ci-dessus sont placées comme sur l'image ci-dessous.



Figure-A II-12 Placement des cales de l'étape #14



Figure-A II-13 Étapes #15 et #16



Figure-A II-14 Étapes #17 et #18

*Il y a certaines personnes avec des pièces, style de même avec des ailes (B7), ils vont essayer de ne pas en passer pour que ce soit plus difficile pour d'autres équipes. [...] Il y a des fois, je vais être honnête, tu peux passer quasiment vingt minutes à y penser (comment placer une pièce).*

*As-tu vu comme là, mettons mes blocs auraient été plus longs, je l'aurais tassé, (B9 vers l'extérieur) parce que de la manière je suis parti, je suis supposé monter carré, sauf que tu peux finaliser en pyramide, mais jamais... **À l'inverse d'une pyramide?** Exact.*



Figure-A II-15 Étapes #19 à 21

Fin du chargement. La Figure-A II-16 présente le résultat final, par contre l'avant et l'arrière y sont inversés par rapport aux photos des différentes étapes.



Figure-A II-16 Photo du résultat du scénario #1 pour le candidat #3



## ANNEXE III

### TRANSCRIPTION DE LA QUESTION #7

**Comment gérez-vous le poids chargé sur la semi-remorque? Comment savez-vous la limite de poids à mettre sur une semi-remorque?**

- 1) *Je l'ai sur ma liste. J'ai exemple 34 beams ou colonnes à mettre, je vais avoir mon poids total de tout ça. Si je vois que c'est 57 ou 59 [mille livres], on va pousser pour tout mettre, et garder notre hauteur qui est de 13 pieds 6. **13 pieds 6 à partir du sol?** Oui, à partir du sol.*
- 2) *On a l'étiquette sur chacune des pièces, le poids est écrit. Et aussi, comme moi je charge avec un lift, je fais des paquets en conséquence de mon lift, je peux charger 18000 livres. Fait que je m'arrange tout le temps pour faire des paquets de 15-16, fait que si je mets 16 en arrière, 16 en avant, je suis déjà rendu à 32 [mille livres]. Fait qu'il me reste 30 000 livres, faut que je le partage en conséquence. **Comment est-ce que vous savez c'est quoi la limite de poids à mettre sur un camion?** C'est avec les années, là. Les chauffeurs... bien, on le sait pas, comment je te dirais ça, il y a le nombre d'essieux aussi. **Mais, qu'est-ce qui vous donne l'information à vous, c'est tu le chauffeur directement, ou vous l'avez ailleurs?** Moi première des choses, j'ai mes listes de chargement, mettons que j'ai 70 000 livres, c'est sûr que ça va être une quatre essieux qu'on va réserver. On ne peut pas y aller avec une deux essieux, on n'a pas le droit. Je connais pas mal toutes les limites des trailers. **Dépendamment du nombre d'essieux?** C'est ça.*
- 3) *On a une feuille qui nous dit toutes les pièces, chaque pièce ont leur poids, et le poids est divisé mettons exemple t'avais 120 000 livres de pièces, tout dépendamment où ça va, mettons ça va dans l'Ouest, tu peux pas aller à plus que mettons 40 ou 45 000, aux États c'est peut-être 35 000, fait que là faut que tu divises ton poids par la norme respective que tu vas avoir. Ça peut donner trois trailers par exemple. **Une fois que vous avez divisé ça, qu'est-ce qui vous dit que vous êtes rendus à 30 ou 35 000 par exemple?** Ça ne fait pas un si grand lapse de temps on va dire, mais on a scanner, on scan chaque pièce, ça le calcul et ça nous dit le nombre de poids qu'on est rendu. Sinon, on le faisait à la mitaine avec une calculatrice.*
- 4) *Nous autres, c'est en scannant. Au fur et à mesure qu'on met une pièce, on la scan chargée, le poids s'accumule. À chaque fois qu'on scan une pièce. **Et dans le fond, vous savez que le camion peut charger tant?** Oui. Normalement c'est marqué sur les listes de chargement. On commence à le savoir aussi, un petit peu par cœur. **Est-ce que vous avez mettons, pour ce camion-là, une liste de pièces à charger dessus?** Oui. On a une ou plusieurs séquences sur la feuille de chargement, les feuilles de chargement, et faut essayer de les compléter. C'est comme je t'expliquais tantôt, eux ils touchent leur revenu*

*de même, fait que tant et aussi longtemps que tu ne finiras pas de charger toute la séquence, bin ils n'aiment pas ça que t'en commence une autre. Souvent, me semble, cette pièce-là irait bien là. Tant qu'à mettre 800 livres de bois pour compenser pour un autre beam d'une autre séquence, tu sais. Ça c'est dur leur faire comprendre ça.*

- 5) *On a un scanner, chaque pièce est identifiée avec un code à barre. Pi on a un scanner, pi à mesure qu'on scan le poids s'accumule. **Fait que j'imagine que vous devez vous garder un petit lousse pour les cales de bois?** Oui, moi je calcule toujours, je mets en moyenne 60 lb du bloc. En moyenne, comme là en ce moment c'est 80 à peu près. Ils sont gelés dur et sont coupés plein de sève, donc très pesants. **Et comment vous savez c'est quoi la limite de poids à mettre sur le camion?** Ça le dispatcher nous l'informe. Et le nombre d'essieux. Si ça va aux États-Unis 45 000 sur deux essieux, ici on a le droit à... ici c'est démesuré c'est pour ça qu'on a des belles routes. **On a déjà monté jusqu'à pas loin de 80 000, avec des bi-trains? Des bi-trains?** Deux trailers bout à bout.*

## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 3D Systems, Inc. 2013. « Cube® 3D Printer tech specs ». En ligne. < <http://cubify.com/cube/specs.aspx> >. Consulté le 30 mai 2013.
- Albert, Charles, et ICCA/CISC. 2010. « Lexique anglais-français : Charpentes d'acier ». PDF en ligne. < [http://quebec.cisc-icca.ca/Library/pdf/publications/ICCA\\_lexique\\_EN-FR.pdf](http://quebec.cisc-icca.ca/Library/pdf/publications/ICCA_lexique_EN-FR.pdf) >. Consulté le 5 janvier 2013.
- Bortfeldt, Andreas, et Gerhard Wäscher. 2013. « Constraints in container loading – A state-of-the-art review ». *European Journal of Operational Research*, vol. 229, n° 1, p. 1-20.
- Brown, David. 2009. « 53 foot Flat Bed Semi Trailer ». < <http://www.3dcontentcentral.com/download-model.aspx?catalogid=171&id=129266> >. Consulté le 14 mars 2014.
- buildingSMART. 2014a. « About buildingSMART ». Page web. < <http://www.buildingsmart.org/about/about-buildingsmart/> >. Consulté le 8 octobre 2014.
- buildingSMART. 2014b. « Industry Foundation Classes (IFC) data model ». < <http://www.buildingsmart.org/standards/ifc> >. Consulté le 2014-04-14.
- Bureau de la traduction. 2013. « TERMIUM Plus®, la banque de données terminologiques et linguistiques du gouvernement du Canada ». En ligne. < <http://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-fra.html?lang=fra> >. Consulté le 30 mai 2013.
- COMT. 2011. « Réglementation des poids et dimensions limites des véhicules lourds utilisés pour le transport interprovincial ». Ottawa, Ontario, Canada: Conseil des ministres responsables des transports et de la sécurité routière 37 p. < <http://www.comt.ca/english/programs/trucking/MOU%202011%20French.pdf> >. Consulté le 29 décembre 2012.
- Eastman, Chuck, Paul Teicholz, Rafael Sacks et Kathleen Liston. 2011. *BIM Handbook : A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*, Second Edition. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 650 p.
- Egeblad, Jens, Claudio Garavelli, Stefano Lisi et David Pisinger. 2010. « Heuristics for container loading of furniture ». *European Journal of Operational Research*, vol. 200, n° 3, p. 881-892.

Federal Information Processing Standards Publication. 2001. « Announcing the ADVANCED ENCRYPTION STANDARD (AES) ». United States National Institute of Standards and Technology (NIST). < <http://csrc.nist.gov/publications/fips/fips197/fips-197.pdf> >. Consulté le 28 octobre 2013.

FHWA. 2004. « Federal Size Regulations For Commercial Motor Vehicles ». Washington, DC, États-Unis: Federal Highway Administration, 24 p. < [http://www.ops.fhwa.dot.gov/freight/publications/size\\_regs\\_final\\_rpt/size\\_regs\\_final\\_rpt.pdf](http://www.ops.fhwa.dot.gov/freight/publications/size_regs_final_rpt/size_regs_final_rpt.pdf) >. Consulté le 5 janvier 2013.

FHWA. 2006. « Bridge Formula Weights ». FHWA, 10 p. < [http://www.ops.fhwa.dot.gov/freight/publications/brdg\\_frm\\_wghts/bridge\\_formula\\_all.pdf](http://www.ops.fhwa.dot.gov/freight/publications/brdg_frm_wghts/bridge_formula_all.pdf) >. Consulté le 5 janvier 2013.

Gibson, Ian, David W. Rosen et Brent Stucker. 2010. *Additive Manufacturing Technologies : Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Boston, MA: Springer Science+Business Media, LLC, 459 p.

Gouvernement du Québec. 2012. *Loi concernant les propriétaires, les exploitants et les conducteurs de véhicules lourds*. Québec: Gouvernement du Québec. < [http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=P\\_30\\_3/P30\\_3.html](http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=P_30_3/P30_3.html) >. Consulté le 5 janvier 2013.

ICCA. 2009. *ICCA Code de pratique standard pour l'acier de charpente*, 7e édition. Markham, ON, Canada: Institut canadien de la construction en acier, 60 p.

Khemlani, Lachmi. 2004. « The IFC Building Model: A Look Under the Hood ». Article en ligne. < <http://www.aecbytes.com/feature/2004/IFCmodel.html> >. Consulté le 6 janvier 2013.

Khemlani, Lachmi. 2005. « The CIS/2 Format: Another AEC Interoperability Standard ». Article en ligne. < <http://www.aecbytes.com/buildingthefuture/2005/CIS2format.html> >. Consulté le 6 janvier 2013.

Liebich, Thomas, Yoshinobu Adachi, James Forester, Juha Hyvarinen, Stefan Richter, Tim Chipman, Matthias Weise et Jeffrey Wix. 2013. « Industry Foundation Classes - IFC4 Official Release ». HTML Documentation. < <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/final/html/index.htm> >. Consulté le 31 juillet 2014.

McGraw-Hill Construction. 2011. « Prefabrication and Modularization: Increasing Productivity in the Construction Industry ». *SmartMarket Report*. p. 56.

Moor, Chris. 2011. « The New AISC Interoperability Strategy ». *Modern Steel Construction*, vol. November 2011.

- MTQ. 2005. « Guide des normes de charges et dimensions des véhicules ». Québec, Canada: Gouvernement du Québec, 30 p. < [http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/Librarie/Publications/fr/camionnage/charges\\_dimensions/guide.pdf](http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/Librarie/Publications/fr/camionnage/charges_dimensions/guide.pdf) >. Consulté le 17 décembre 2012.
- MTQ. 2013. « Guide des normes de charges et dimensions des véhicules routiers ». Québec, Canada: Gouvernement du Québec, 44 p. < [http://www.mtq.gouv.qc.ca/centredocumentation/Documents/Usagers/V%C3%A9hicule%20lourd/Charges%20et%20dimensions/Guide%20des%20normes\\_WEB.pdf](http://www.mtq.gouv.qc.ca/centredocumentation/Documents/Usagers/V%C3%A9hicule%20lourd/Charges%20et%20dimensions/Guide%20des%20normes_WEB.pdf) >.
- NAFTA. 1997. « Harmonization of Vehicle Weight and Dimension Regulations Within the NAFTA Partnership ». NAFTA, 56 p. < <http://www.comt.ca/english/programs/trucking/NAFTA%20Side%20by%20Side%20Oct%2097.pdf> >. Consulté le 5 janvier 2013.
- NIST. 2012. « CIS/2 and IFC - Product Data Standards for Structural Steel ». En ligne. < <http://cic.nist.gov/vrml/cis2.html> >. Consulté le 6 janvier 2013.
- OQLF. 1982. « Fiche terminologique - Poutre à larges ailes ». < [http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=8890050](http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8890050) >. Consulté le 9 juillet 2014.
- OQLF. 1983. « Fiche terminologique - Aile ». < [http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=8428413](http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8428413) >. Consulté le 9 juillet 2014.
- OQLF. 1984. « Fiche terminologique - Profilé en C ». < [http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=2091495](http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=2091495) >. Consulté le 9 juillet 2014.
- OQLF. 1996. « Fiche terminologique - Semi-remorque plateau ». < [http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=2075634](http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=2075634) >. Consulté le 7 juillet 2014.
- OQLF. 2000. « Fiche terminologique - Âme ». < [http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=8890956](http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8890956) >. Consulté le 9 juillet 2014.
- OQLF. 2001. « Fiche terminologique - Camion ». < [http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=2075947](http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=2075947) >. Consulté le 7 juillet 2014.

OQLF. 2004. « Fiche terminologique - Membre ». < [http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=2069395](http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=2069395) >. Consulté le 25 mars 2014.

OQLF. 2006. « Fiche terminologique - Pivot d'attelage ». < [http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=2076826](http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=2076826) >. Consulté le 9 avril 2014.

OQLF. 2008. « Fiche terminologique - Modélisation des données d'un bâtiment ». < [http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=26501014](http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26501014) >. Consulté le 9 juillet 2014.

Schulman, Joseph F. . 2003. *Heavy Truck and Dimension Limits in Canada*. The Railway Association of Canada, 32 p. < <http://www.highwaysafetyroundtable.ca/member/documents/RAC%20Heavy%20Truck%2003.pdf> >. Consulté le 17 décembre 2012.

SDS/2 by Design Data. 2012. « How/2 Get Started in SDS/2 v7.2 ». Liste de vidéos. < <https://www.youtube.com/playlist?list=PLGwaXRvxNTNgW3lh8cvJxixLXg4I2w8oD> >. Consulté le 21 juillet 2014.

Shapeways, Inc. 2013a. « 3D Printing in Alumide on Shapeways ». En ligne. < <http://www.shapeways.com/materials/alumide> >. Consulté le 28 mai 2013.

Shapeways, Inc. 2013b. « 3D Printing in Strong & Flexible Plastic on Shapeways ». En ligne. < <http://www.shapeways.com/materials/strong-flexible> >. Consulté le 28 mai 2013.

SolidXperts, Inc. 2011. « Home - SolidXperts ». En ligne. < <http://www.solidxperts.com/> >. Consulté le 30 mai 2013.

Stratasys Ltd. 2011. « Fortus 250mc ». PDF en ligne. < <http://www.stratasys.com/3d-printers/production-series/~/media/C71DAE2CFCD247A5B64BC2D108EC23B8.ashx> >. Consulté le 28 mai 2013.

Stratasys Ltd. 2013. « PolyJet Technology - 3D print precision prototypes in a wide range of materials ». En ligne. < <http://www.stratasys.com/3d-printers/technology/polyjet-technology> >. Consulté le 4 juin 2013.

Thériault, Louise. 2014. « La fabrication additive : un casse-tête terminologique 3D ». *Circuit*. Vol. 124. < <http://www.circuitmagazine.org/chroniques/des-mots/la-fabrication-additive-un-casse-tete-terminologique-3d> >. Consulté le 2 janvier 2015.

Wäscher, Gerhard, Heike Haußner et Holger Schumann. 2007. « An improved typology of cutting and packing problems ». *European Journal of Operational Research*, vol. 183, n° 3, p. 1109-1130.

Wohlers, Terry. 2012. *Wohlers Report 2012 : Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry*. Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates, 250 p.

Zimmer, Lori. 2013. « Staples Becomes First Major US Retailer to Sell 3D Printers ». *inhabitat*. < <http://inhabitat.com/staples-to-be-first-major-us-retailer-to-sell-3d-printers/> >. Consulté le 29 mai 2013.