



Analyse critique et optimisation d'un processus de production d'éléments préfabriqués en bois

Mémoire

Pierre Ultré

Maîtrise en génie mécanique - avec mémoire
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

Analyse critique et optimisation d'un processus de production d'éléments préfabriqués en bois

Mémoire

Pierre Ultré

Sous la direction de :

Nadia Lehoux, directrice de recherche
Sylvain Ménard, codirecteur de recherche

Résumé

La construction industrialisée est actuellement en plein essor au Québec et ailleurs dans le monde. Le secteur étant toutefois fortement fragmenté, beaucoup de petits producteurs font face à un manque de capacité et ont des processus de gestion de la production peu développés. Ce projet de maîtrise s'intéresse aux façons d'améliorer les processus de production dans ce domaine pour gagner en efficacité. Une revue de la littérature permet tout d'abord de faire un état des lieux de la planification et de la gestion de la production dans la construction industrialisée. Elle compare ce secteur à la construction traditionnelle et au secteur manufacturier puis recense les différents problèmes auxquels les entreprises peuvent faire face ainsi que leurs solutions si elles sont connues. Une étude de cas concernant une entreprise québécoise spécialisée dans la production d'éléments préfabriqués étudie par la suite en détail un processus de production de panneaux de murs et **présente** des améliorations qui pourraient être effectuées afin de diminuer les temps d'opération et de mieux utiliser la capacité de production tout en respectant la contrainte de disponibilité de la main d'œuvre. Un modèle de simulation est alors développé afin d'éprouver ces propositions d'amélioration et **d'évaluer** le gain en efficacité que chacune peut fournir pour répondre à une augmentation de la demande. Il est alors montré que les améliorations les plus intéressantes sont celles nécessitant un investissement dans les technologies d'automatisation.

Abstract

Currently, industrialized housing is facing an increased demand while a lot of small producers have to deal with a lack of capacity and non-automated production processes. This master thesis focuses on the way to improve the production processes in this field in order to gain efficiency. First, a literature review leads to a comprehensive state of the art concerning scheduling and production management practices in industrialized housing. It compares this sector to the traditional construction field and the manufacturing industry. It then identifies the various problems enterprises may face while suggesting potential solutions. Thereafter a case study involving a company specialized in producing prefabricated elements is studied in detail. The focus is on the processes conducted to manufacture panels. Improvements that should be implemented in order to decrease operation times as well as better use the production capacity while respecting the labor's availability constraint are proposed. A simulation model is therefore developed to test those suggestions and to evaluate the gain each solution can generate so as to meet a rise in demand. Results show that the most interesting improvements are those involving to invest in automation technologies.

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures.....	ix
Liste des abréviations et sigles	xi
Remerciements.....	xii
Introduction.....	1
1 Concepts préliminaires	5
1.1 La préfabrication.....	5
1.2 La construction en bois.....	6
1.3 La simulation	7
2 Revue de la Littérature.....	13
2.1 Revue Systématique de la Littérature : Méthodologie	13
2.1.1 Planifier la revue.....	13
2.1.2 Conduire la revue	14
2.1.3 Analyse descriptive.....	18
2.2 Revue systématique de la littérature : Analyse Thématique.....	20
2.2.1 Quelle valeur présente les méthodes modernes de construction face à la construction traditionnelle ?	20
2.2.2 Quels sont les points de différenciation entre le secteur de la construction industrialisée et le secteur manufacturier ?	23
2.2.3 Quels sont les problèmes majeurs que rencontre l'industrie du préfabriqué ? Et s'il y a lieu, quelles sont les solutions proposées ?	25
2.2.4 Quels outils, équipements, moyens sont ou peuvent être mis en place pour supporter et conduire la production de structures préfabriquées ?	27
2.2.5 Quels sont les intérêts de l'utilisation du bois d'œuvre face à d'autres matériaux dans le secteur de la construction préfabriquée ?.....	29
2.3 Littérature grise.....	30
2.3.1 Méthode de recherche.....	30
2.3.2 Résultats et discussion	31
3 Cas d'études.....	36
3.1 Présentation de l'entreprise	36
3.2 Modélisation du processus	37
3.3 Problèmes observés	40
3.4 Proposition d'améliorations.....	41
3.4.1 Description et impact	42
3.4.2 Mise en place	44
4 Modèle de simulation.....	45
4.1 Implémentation dans le logiciel de simulation – hypothèses de simplification	45
4.1.1 Caractéristiques des produits	46
4.1.2 Temps d'opération.....	47
4.1.3 Le modèle de simulation.....	48
4.2 Vérification et Validation du modèle.....	51
4.2.1 Validation du modèle conceptuel	52
4.2.2 Vérification de l'implémentation	52

4.2.3	Validation opérationnelle	53
4.3	Expérimentations	57
4.4	Les indicateurs de performances	60
5	Résultats et discussion	62
5.1	Résultats par scénario	62
5.1.1	Existant.....	62
5.1.2	Familles de produits.....	65
5.1.3	Guides lasers.....	69
5.1.4	Table de pré-assemblage	71
5.1.5	Poste de préparation des entremises	74
5.1.6	Automate d'assemblage	78
5.2	Comparaison des scénarios	80
	Conclusion.....	86
	Bibliographie.....	89
	Annexes.....	94
A	Diagrammes d'activités	95
B	Taux d'occurrence Hauteur et Longueur	105
C	Temps d'opération pour le processus de production des panneaux de murs	107
D	Processus de fabrication d'éléments préfabriqués : état de l'art et analyse d'un cas d'études	108

Liste des tableaux

Tableau 1 - Tableau récapitulatif des termes de recherche.....	15
Tableau 2 - Liste des articles obtenus via "Engineering village"	16
Tableau 3 - Liste des articles obtenus via "Engineering village" après filtrage.....	17
Tableau 4 - Liste des articles obtenus via "Web of Science"	18
Tableau 5 - Liste des articles obtenus via « Web of Science » après filtrage	18
Tableau 6 - Période et lieu et secteur des études composant la revue de littérature	19
Tableau 7 - Table de recensement des réponses aux questions de recherche par article	20
Tableau 8 - Tableau récapitulatif des éléments de réponse à la question 1	23
Tableau 9 - Tableau récapitulatif des éléments de réponse à la question 2	24
Tableau 10 - Tableau récapitulatif des éléments de réponse à la question 3	27
Tableau 11 - Tableau récapitulatif des éléments de réponse à la question 4	28
Tableau 12 - Tableau récapitulatif des recherches d'équipementiers	32
Tableau 13 - Tableau récapitulatif des types d'équipements proposés par équipementiers	33
Tableau 14 - Évaluation de l'investissement et de la complexité de chaque amélioration	44
Tableau 15 - Tableau descriptif des caractéristiques de panneau de mur.....	46
Tableau 16 - Distribution des caractéristiques des panneaux	47
Tableau 17 - Récapitulatif des opérateurs et leurs tâches attitrées	50
Tableau 18 - Récapitulatif des paramètres de décision utilisés pour la validation opérationnelle du modèle de base	56
Tableau 19 - Récapitulatif des méthodes d'implémentation des améliorations suggérées	60
Tableau 20 - Résultats pour le scénario "Existant" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)	63
Tableau 21 - Résultats pour le scénario "Existant"- Taux d'occupation des opérateurs....	64
Tableau 22 - Résultats pour le scénario "Existant"- Taux d'occupation des postes de production.....	65
Tableau 23 - Résultats pour le scénario "Familles de produits" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités).....	66
Tableau 24 - Résultats pour le scénario "Familles de produits" - Taux d'occupation des opérateurs	67
Tableau 25 - Résultats pour le scénario "Familles de produits" - Taux d'occupation des postes de production.....	68
Tableau 26 - Résultats pour le scénario "Guides Lasers" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités).....	69
Tableau 27 - Résultats pour le scénario " Guides Lasers" - Taux d'occupation des opérateurs	70
Tableau 28 - Résultats pour le scénario "Guides Lasers" - Taux d'occupation des postes de production.....	71
Tableau 29 - Résultats pour le scénario "Table de pré-assemblage" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)	72
Tableau 30 - Résultats pour le scénario " Table de pré-assemblage" - Taux d'occupation des opérateurs.....	73
Tableau 31- Résultats pour le scénario " Table de pré-assemblage" - Taux d'occupation des postes de production.....	74
Tableau 32 - Résultats pour le scénario "Poste de préparation des entremises" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités).....	75

Tableau 33 - Résultats pour le scénario " Poste de préparation des entremises" - Taux d'occupation des opérateurs	76
Tableau 34 - Résultats pour le scénario "Poste de préparation des entremises" - Taux d'occupation des postes de production	77
Tableau 35 - Résultats pour le scénario "Automate d'assemblage" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)	78
Tableau 36 - Résultats pour le scénario " Automate d'assemblage" - Taux d'occupation des opérateurs	79
Tableau 37- Résultats pour le scénario "Automate d'assemblage" - Taux d'occupation des postes de production.....	80
Tableau 38 - comparaison des scénarios simulés.....	82
Tableau 39 - Identification du poste goulot par scénario et par taux d'arrivée	82
Tableau 40 - Évaluation des améliorations - investissement, complexité et réponse à la demande.....	84
Tableau 41 - Distribution des Longueurs de panneau	105
Tableau 42 - Distribution des hauteurs de panneau	106
Tableau 43 - Temps d'opération pour le processus de production des panneaux de murs	107

Liste des figures

Figure 1 – Version simplifiée du processus de développement d'un modèle (Sargent, 2013)	9
Figure 2 - Schéma en deux dimensions de la structure type d'un panneau de mur.....	38
Figure 3 - Processus de production – Assemblage des panneaux de murs	39
Figure 4 - Visuel du modèle de simulation pour la production des panneaux de murs structuraux chez Structures Ultratec	48
Figure 5 - Agrandissement du modèle de simulation - étapes de préparation	49
Figure 6 - Visuel de la simulation avec des outils de vérification de l'implémentation.....	52
Figure 7 - Visuel du modèle de simulation après ajout du poste de préparation des entremises.....	58
Figure 8 - Résultats pour le scénario "Existant" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)	63
Figure 9 - Résultats pour le scénario "Existant" - Taux d'occupation des opérateurs	64
Figure 10 - Résultats pour le scénario "Existant" - Taux d'occupation des postes de production.....	65
Figure 11 - Résultats pour le scénario "Familles de produits" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités).....	66
Figure 12 - Résultats pour le scénario "Familles de produits" - Taux d'occupation des opérateurs	67
Figure 13 - Résultats pour le scénario "Familles de produits" - Taux d'occupation des postes de production.....	68
Figure 14 - Résultats pour le scénario "Guides Lasers" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)	69
Figure 15 - Résultats pour le scénario " Guides Lasers" - Taux d'occupation des opérateurs	70
Figure 16 - Résultats pour le scénario "Guides Lasers" - Taux d'occupation des postes de production.....	71
Figure 17 - Résultats pour le scénario "Table de pré-assemblage" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)	72
Figure 18 - Résultats pour le scénario " Table de pré-assemblage" - Taux d'occupation des opérateurs	73
Figure 19- Résultats pour le scénario " Table de pré-assemblage" - Taux d'occupation des postes de production.....	74
Figure 20 - Résultats pour le scénario "Poste de préparation des entremises" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités).....	75
Figure 21 - Résultats pour le scénario " Poste de préparation des entremises" - Taux d'occupation des opérateurs.....	76
Figure 22 - Résultats pour le scénario "Poste de préparation des entremises" - Taux d'occupation des postes de production	77
Figure 23 - Résultats pour le scénario "Automate d'assemblage" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)	78
Figure 24 - Résultats pour le scénario " Automate d'assemblage" - Taux d'occupation des opérateurs	79
Figure 25 - Résultats pour le scénario "Automate d'assemblage" - Taux d'occupation des postes de production.....	80
Figure 26 - Légende pour lecture des diagrammes de l'annexe A.1.....	95

Figure 27 - Processus de production - coupe et marquage des lisses	95
Figure 28 - Processus de production - Coupe du revêtement	96
Figure 29 - Processus de production - Pré-assemblage des ouvertures et montants	96
Figure 30 - Processus de production - Assemblage de la structure.....	97
Figure 31 - Processus de production - Isolation	98
Figure 32 - Processus de production – Inspection	99
Figure 33 - Légende pour lecture des Graphiques d'analyse de processus de l'annexe A.2	100
Figure 34 - Graphique d'analyse de processus - préparation des plaques	100
Figure 35 – Graphiques d'analyse de processus – Coupe manuelle & mécanique	101
Figure 36 - Graphique d'analyse de processus pour assemblage des fermes de toit	102
Figure 37 - Graphiques d'analyse de processus - Fabrication des pattes de hip & Assemblage des hip	103
Figure 38 – Graphiques d'analyse de processus – Expédition Panneaux de murs & Fermes de toit.....	104

Liste des abréviations et sigles

MMC : *Modern Methods of construction* = Méthodes de construction modernes

IH : *Industrial Housing* = Construction Industrialisée

RFID : *Radio-Frequency Identification Device* – Appareil d'identification à radiofréquence

LS : Usine de Laurier-Station

SC : Usine de Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier

SED : Simulation à Événements Discrets

Distance c/c : Distance centre à centre

½ IC : Demi-Intervalle de Confiance

IC : Intervalle de Confiance

NMC : Nombre Moyen de Chariots

UE : Union Européenne

Remerciements

Cette maîtrise a pu être réalisée grâce au concours de plusieurs personnes à qui je souhaite témoigner ma reconnaissance.

Tout d'abord je remercie chaudement Mme Nadia Lehoux qui, en qualité de directrice de recherche, a fait preuve d'une grande disponibilité et de patience et a su me donner de nombreux conseils avisés tout au long de mon parcours.

Je remercie aussi M. Sylvain Ménard, co-directeur de cette maîtrise, qui a été d'un grand support pour alimenter mon travail.

Je voudrais enfin remercier la Chaire Industrielle de Recherche sur la Construction Écoresponsable en Bois (CIRCERB) et le partenaire de ce projet, la société *Structures Ultratec*, et notamment mon interlocuteur principal, Benoît Delisle, sans qui ce projet n'aurait pu être mené à bien.

Introduction

La demande en logement est toujours existante et ne cessera jamais. En effet c'est une demande cyclique dans le sens où le besoin de se loger est permanent pour chacun tandis que les installations ne le sont pas. (Egebo, Richardson, & Lienert, 1990). Peu importe le pays, la zone géographique ou le niveau économique, le logement est un droit et une nécessité pour tous. Pourtant le logement est en général le premier poste de dépense des ménages, notamment pour les moins aisés. Dans les pays de l'OCDE et de l'UE, considérés comme riches, beaucoup de ménages à faibles revenus sont encore mal logés. ("La base de données de l'OCDE sur le logement abordable - OCDE," n.d.). On observe pourtant que ce sont précisément ces ménages qui ont le plus de besoins. Même si la crise économique de la dernière décennie a réduit la demande en logement, cette dernière repart aujourd'hui à la hausse dans les pays industrialisés. Selon une étude du groupe Freedonia datant de juillet 2015, la construction mondiale de logements devrait augmenter de 3% par an pour atteindre 2.3 milliards d'unités en 2019 ("World Housing - Industry Market Research, Market Share, Market Size, Sales, Demand Forecast, Market Leaders, Company Profiles, Industry Trends," n.d.). Seulement, l'industrie de la construction n'est pas toujours en mesure de répondre à la demande ou d'y arriver à des prix raisonnables. Et pour preuve, on peut lire dans le texte d'introduction à ("La base de données de l'OCDE sur le logement abordable - OCDE," n.d.) « Les besoins en matière de logement sont souvent insatisfaits, et aujourd'hui un nombre important de personnes dans l'ensemble de l'OCDE sont sans abri et un trop grand nombre de ménages vivent dans des logements de mauvaise qualité ou font face à des coûts de logement qu'ils ne peuvent pas assumer. ». En effet, l'industrie se révèle très fragmentée et elle utilise des méthodes qui ne s'avèrent pas toujours des plus efficaces.

C'est pourquoi l'industrie de la construction est aujourd'hui en cours de transformation. De plus en plus, les techniques de construction traditionnelles sont abandonnées ou révisées au profit de méthodes de construction plus modernes telles que la préfabrication. Ces pratiques peuvent être en grande partie apparentées à celles d'autres secteurs industriels tels que le secteur manufacturier, le principe étant de réduire les gaspillages et de faire des économies tout en augmentant les capacités de production. Ces nouvelles techniques de construction peuvent aussi être plus écologiques, ce qui amène les producteurs à s'y intéresser.

Dans le cadre de la Chaire industrielle de recherche sur la construction écoresponsable en bois (CIRCERB), en partenariat avec l'entreprise Structures Ultratec, la question de l'optimisation des moyens de production de la construction préfabriquée en bois a été soulevée. Cette entreprise a actuellement un manque de main-d'œuvre qui limite les capacités de production de plusieurs usines. Ce n'est pas un problème inconnu, car différents pays dans le monde comme le Royaume-Uni observent cette même réduction de main d'œuvre (Pan, Gibb, & Dainty, 2008).

Il y a donc, dans le domaine de la construction, un changement de paradigme qui s'opère depuis maintenant quelques décennies. La construction préfabriquée prend peu à peu une importance plus grande face à la construction traditionnelle. Les organisations doivent ainsi chercher à développer de nouvelles méthodes et à les améliorer au cours du temps pour rendre leur système de production davantage tourné vers ce nouveau mode de pensée. Les changements les plus importants sont observés dans le transfert des activités du site d'érection vers un site de préfabrication, entraînant ainsi l'apparition de processus de production dans un milieu contrôlé. Cependant, ces nouvelles méthodes demeurent mal connues, alors qu'un manque de documentation et de transfert de connaissances chez les acteurs industriels semble être présent. Un besoin de mieux comprendre les problèmes existants dans le secteur et les progrès qui ont pu être faits jusqu'à maintenant est donc présent, notamment au niveau de la gestion de la production.

Par ailleurs, une entreprise œuvrant au quotidien à l'application des méthodes modernes de construction fait face à la dimension opérationnelle de la question. Quelles pratiques dois-je mettre en place pour rendre mon système plus standardisé, optimisé ou à même de répondre rapidement à un plus grand nombre de tâches de conception de structures à l'interne ? En prenant un cas concret, il est donc intéressant de se demander quelles sont les contraintes majeures que ce type d'entreprise rencontre dans son environnement actuel et quelles sont les actions qu'elle pourrait mettre de l'avant pour surmonter ses difficultés.

Cette recherche vise à faire un état des lieux de la gestion de la production dans la construction préfabriquée, puis à confronter ces résultats au cas concret d'une entreprise du secteur pour ensuite proposer des solutions réalisables permettant d'augmenter la capacité de production de l'organisation.

De manière plus spécifique, ce projet a pour but de :

- Faire un état de l'art de la gestion de la production de la construction préfabriquée ;
- Modéliser un processus de production d'une entreprise œuvrant dans le secteur de la construction préfabriquée en bois ;
- Analyser ce processus pour identifier les problèmes majeurs ;
- Répertoire de bonnes pratiques à mettre de l'avant pour mieux faire face à de tels problèmes ;
- Concevoir un modèle virtuel du système de production à l'étude à l'aide du logiciel de simulation à événements discrets *Simio* ;
- Mesurer à l'aide du modèle de simulation l'effet d'implémenter certaines bonnes pratiques sur le système de production à l'étude ;
- Proposer les meilleures améliorations à apporter pour notamment permettre d'augmenter la capacité de production ;
- Proposer une façon de rendre un peu plus généralisable de telles pratiques à l'industrie de la construction.

Afin de répondre à ces objectifs multiples, une méthodologie en plusieurs étapes fut suivie. Une revue systématique de la littérature a d'abord été menée. Elle a permis de relever les différents problèmes rencontrés dans le secteur de la construction industrialisée et leurs éventuelles solutions. La revue a ensuite été suivie de l'analyse d'un cas réel d'entreprise, œuvrant dans le secteur de la fabrication d'éléments préfabriqués au Québec, *Structures Ultratec*. Cette analyse a permis de mettre en lumière les problèmes majeurs rencontrés par cette entreprise et de faire le lien avec ce qui a pu être souligné dans la littérature pour ensuite proposer un éventail d'améliorations. Enfin, la simulation numérique a été utilisée pour développer un modèle reflétant le processus de production de panneaux de murs de l'entreprise et rendre ainsi possible l'étude d'améliorations à apporter au système pour accroître l'efficacité.

Il a notamment été souligné par plusieurs auteurs que la transformation du secteur s'accompagnait d'une augmentation du besoin en main-d'œuvre ce qui peut être problématique, en particulier dans les pays où cette dernière est plus difficile à trouver.

L'étude de cas a quant à elle montré que le problème du manque de main-d'œuvre s'avère une dure réalité qui ne cesse de prendre de l'ampleur. La simulation a permis cependant de montrer qu'en investissant dans certains équipements tels que des automates d'assemblage, l'efficacité d'une ligne de production, aujourd'hui manuelle, pouvait être accrue d'au moins 40%.

Ces travaux contribuent donc dans un premier temps à mieux faire connaître les difficultés auxquelles peuvent faire face les entreprises de l'industrie du préfabriqué. Ils permettent également d'exposer un processus réel de production particulier, d'en relever les principaux problèmes et d'y proposer des solutions adéquates qui ont été éprouvées à l'aide de la simulation. Pour le milieu industriel, cette recherche contribue de plus à proposer des solutions accessibles permettant de réduire l'impact négatif d'un manque de capacité, surtout face à une demande qui semble vouloir suivre une tendance à la hausse.

Ce mémoire est divisé en cinq chapitres. Tout d'abord, des concepts préliminaires sont explicités, puis la revue de la littérature est présentée. Ensuite, le cas d'étude est présenté puis le modèle de simulation développé est introduit. Enfin, les résultats sont analysés et discutés. Le mémoire se termine par une brève conclusion.

1 Concepts préliminaires

Avant d'entrer dans le vif du sujet, il est nécessaire de présenter certains concepts utilisés pour mener à bien ce projet de maîtrise. Nous expliquerons dans un premier temps ce qu'est la préfabrication, puis nous parlerons du bois en tant que matériaux de construction. Enfin, nous aborderons le thème de la simulation numérique, outil majeur de ce projet.

1.1 La préfabrication

La préfabrication ou construction préfabriquée est une technique de construction consistant à fabriquer des sous-ensembles d'un bâtiment dans un environnement autre que le chantier de construction en amont du processus d'érection. Il y a donc une différence majeure entre la construction traditionnelle et la préfabrication. C'est un changement de paradigme qui s'opère dans ce milieu et vient révolutionner les techniques de construction et par conséquent les modes de fonctionnement des entreprises du secteur (Delemontey, 2007).

Même si les premières traces de la préfabrication remontent à plusieurs siècles, son essor est encore aujourd'hui limité. De manière générale, la construction préfabriquée se développe avec l'industrialisation et emprunte des techniques de production notamment au secteur manufacturier (Delemontey, 2007).

On retrouve les concepts de préfabrication dans la littérature sous différents termes, dont les méthodes de construction modernes (*Modern Methods of Construction – MMC*)¹ que la *House Builders Federation* au Royaume-Uni définit comme « des méthodes qui fournissent un processus de gestion des produits efficace pour fournir plus de produits de meilleure qualité en moins de temps ». Traduit de (Sarden & Engstrom, 2010). Ces méthodes comprennent en grande majorité la « production de logements industrialisés » (*industrialized housing - IH*)² qui est définie comme « la branche de la production de logement qui est partiellement ou totalement réalisée dans un environnement contrôlé (i.e. une usine) utilisant des processus et des machines industrielles ». Traduit de (Branson, Elshennawy, Swart, & Chandra, 1990). Ces nouvelles techniques présentent de nombreux avantages qui seront discutés dans la revue de la littérature présentée ci-après.

¹ Pour alléger le texte, le sigle anglais MMC sera utilisé.

² Pour alléger le texte, le sigle anglais IH sera utilisé.

Comme avancé précédemment, les MMC ne se déroulent pas forcément hors-site. Cependant celles qui nous intéressent ici le sont. C'est pourquoi par la suite, nous ne parlerons implicitement que des MMC hors-site.

Le contexte environnemental actuel pousse les producteurs à chercher des techniques et des matériaux durables. En effet, d'un côté les normes environnementales deviennent de plus en plus strictes et d'un autre côté, cela peut être un avantage concurrentiel majeur puisque la clientèle se tourne, elle aussi, vers les solutions dites vertes ou du moins durables. Nous verrons par la suite que les MMC permettent notamment la réduction des gaspillages et des déchets et l'utilisation de matériaux plus durables. Il est donc intéressant de noter que ces nouvelles méthodes permettent à l'industrie de la construction, reconnue comme étant très polluante, de faire un pas vers le développement durable.

1.2 La construction en bois

L'utilisation du bois dans la construction n'a rien de nouveau en soi. En effet, tout le monde a en tête l'image d'habitations des siècles passés faites, au moins en partie, en bois.

Son utilisation peut être critiquée puisqu'il s'agit d'un matériau vivant et complexe à utiliser. Contrairement à d'autres matériaux comme le béton ou l'acier, il peut être sensible à son environnement, notamment à l'humidité ambiante qui peut causer des variations de dimensions, voire de la pourriture. De plus, étant un matériau ligneux, c'est-à-dire composé de fibres, le bois est anisotrope, c'est-à-dire qu'il n'a pas les mêmes propriétés physiques selon les directions. ("Cecobois - Propriétés Physiques," 2018) Cependant aujourd'hui ce matériau commence à être bien connu et l'utilisation d'essences adéquates, ainsi que l'application de différents procédés de séchage et de traitement chimique permettent de contrer le développement de la pourriture. Au-delà de cette problématique, le bois est un matériau extrêmement durable qui notamment résiste bien aux attaques chimiques issues de son environnement. ("Cecobois - Durabilité," 2018)

Par ailleurs, on pourrait penser que le bois se disqualifie comme matériaux de structure puisqu'il est inflammable. Cependant, aujourd'hui des traitements existent pour limiter cette combustion. De plus le bois a un comportement au feu qui n'est cependant pas plus dangereux que l'acier ou le béton qui, eux, perdent leur résistance mécanique une fois soumis à la chaleur. ("Cecobois - Comportement au feu," 2018)

Certains avantages majeurs sont à noter. Il s'agit d'un matériaux aux propriétés thermiques intéressantes. Entre autres, il a une résistance thermique bien supérieure à l'acier (environ 500 fois) et au béton (environ 7 fois) ainsi qu'une bonne inertie thermique (environ 3 fois plus grande que le béton). Cela en fait un matériau intéressant pour réguler les températures à l'intérieur des bâtiments. ("Cecobois - Propriétés Physiques," 2018). Le plus grand avantage du bois se situe au niveau de son ratio Résistance mécanique/Masse volumique. En effet, à capacité égale, le bois sera le matériau de structure le plus léger. ("Cecobois - Propriétés Mécaniques," 2018) C'est un avantage non négligeable dans le cadre de la construction industrialisée qui implique la manipulation des éléments préfabriqués en usine, mais aussi leur transport sur le site d'érection des bâtiments.

L'ensemble de ces caractéristiques laisse entendre que le bois est un matériau tout à fait fiable et qui est tout à fait à la hauteur de ses concurrents que sont l'acier et le béton. Par ailleurs, il s'agit d'un « matériau vert ». En effet, il a un impact plus faible sur l'environnement que les autres matériaux de structure. Il nécessite moins d'énergie pour son extraction et il est renouvelable. ("Cecobois - Écologique," 2018)

Le bois de construction a donc de nombreux avantages qui expliquent un regain de popularité ces dernières années ainsi qu'un avantage économique dans le contexte actuel.

1.3 La simulation

La simulation numérique est un outil puissant que l'on peut définir comme « la représentation du comportement d'un processus physique, industriel, biologique, économique ou militaire au moyen d'un modèle matériel dont les paramètres et les variables sont les images de ceux du processus étudié » (Larousse, n.d.).

Plusieurs raisons peuvent pousser à utiliser la simulation. Dans le cas présent, on pourra retenir les suivantes :

- Il est trop difficile de traiter le système analytiquement, le processus de production étant trop variable ;
- La simulation permet la prédiction, notamment des besoins futurs du système et de son comportement selon différentes configurations ;

- La simulation évite de faire des essais in situ et donc simplifie grandement la réalisation d'études de cas (Ruiz & Gagliardi, 2017);

La simulation présente aussi quelques inconvénients tels que le temps pour la création du modèle, le besoin de connaissances approfondies pour la maîtrise du logiciel et la nécessité de simplification de la réalité pour traduire un système complexe en modèle abstrait (Ruiz & Gagliardi, 2017). Ce sont toutefois des inconvénients mineurs face aux gains que cela représente.

Le développement d'un modèle de simulation implique l'élaboration d'une modélisation conceptuelle, la conception d'un modèle informatisé, la vérification du modèle ainsi créé et sa validation.

Le modèle conceptuel correspond à ce qui doit être simulé. Il n'y a donc pas de technique précise, ou plutôt les techniques de modélisation sont celles du domaine étudié. En l'occurrence dans le cadre de ce projet, ce sont des diagrammes d'activités qui ont été utilisés (cf. section 3.2).

Le modèle informatisé ou modèle de simulation est celui qui est implémenté pour pouvoir mener des expériences par la suite. Nous utiliserons plus précisément la simulation à événements discrets via le logiciel *Simio*. Elle se caractérise notamment par l'utilisation d'un temps discret, ou asynchrone. L'horloge de la simulation se déplace alors d'un événement à l'autre et non par intervalle de temps précis.

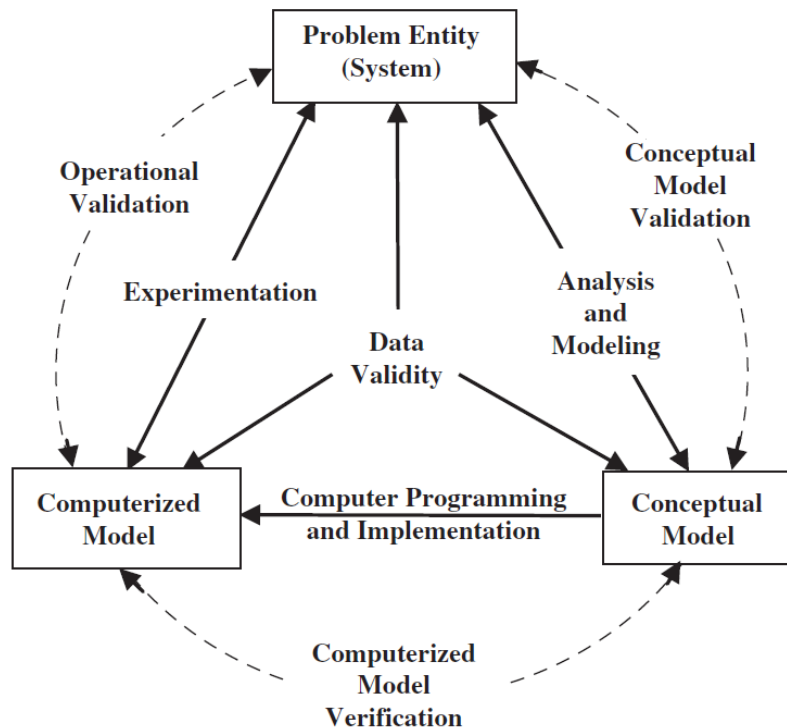


Figure 1 – Version simplifiée du processus de développement d'un modèle (Sargent, 2013)

La Figure 1 présente de manière simple et générique le processus à suivre pour développer un modèle de simulation. On peut y observer que la vérification et validation du modèle jouent un rôle très important dans ce processus. La vérification est définie comme « le fait de s'assurer que le programme informatique du modèle de simulation et son implémentation sont adéquats. » Tandis que la validation correspond à « la justification que le modèle possède une précision satisfaisante dans son domaine d'application et en adéquation avec l'usage pour lequel le modèle est dédié. » (Traduit de (Sargent, 2013).) En effet, cela permet notamment de donner de la crédibilité au modèle de simulation et aux résultats des expériences qui peuvent être menées à l'aide de ce modèle (Sargent, 2013). Il existe de nombreuses méthodes pour valider et vérifier les modèles de simulation. En voici d'ailleurs une liste traduite de (Sargent, 2013) :

- *Animation* : Le comportement opérationnel du modèle est affiché à l'écran lorsque le modèle est en mouvement au cours du temps.[...].
- *Comparaison à d'autres modèles* : Différents résultats (par exemple des réponses) du modèle de simulation qui est en train d'être validé sont comparés aux résultats de d'autres modèles de simulation (valides). [...].

- *Conformité des relations entre données* : La conformité des relations entre données requiert que des données aient la valeur adéquate en fonction d'une relation entre certaines données ou parmi d'autres données. [...].
- *Les tests dégénérés* : La dégénérescence du comportement du modèle est éprouvée par une sélection appropriée des valeurs d'entrées et des paramètres internes. [...].
- *La validité des événements* : les séquences d'événements du modèle de simulation sont comparées à celles du système réel pour déterminer si elles sont similaires. [...].
- *Test des conditions limites* : La structure et les sorties du modèle devraient être plausibles pour toute combinaison limite ou non souhaitable des niveaux de facteurs dans le système.
- *La validité apparente* : des personnes connaissant bien le système sont interrogées sur le caractère raisonnable du modèle et/ou de son comportement. [...].
- *La validation par données historiques* : Si des données historiques existent [...], les données sont en partie utilisées pour développer le modèle et en partie pour déterminer si le modèle se comporte comme il le devrait.
- *Validité interne* : Plusieurs répliques d'un modèle stochastique sont faites pour déterminer la variabilité dans le modèle. Beaucoup de variabilité parmi les répliques peut occasionner une contestation des résultats du modèle [...].
- *Validation multiétage* : Naylor et Finger (1967) ont proposé de combiner la philosophie des méthodes scientifiques du rationalisme, de l'empirisme et de l'économie positive dans un processus multiétage de validation. Cette méthode de validation consiste en (1) développer le modèle à partir de la théorie, des observations et des connaissances générales ; (2) valider expérimentalement les hypothèses du modèle lorsque possible ; (3) Comparer (tester) les relations entrées-sorties du modèle au système réel.
- *Graphiques opérationnels* : La valeur de différentes mesures de performance [...] est montrée graphiquement lorsque le modèle fonctionne au cours du temps ; c'est-à-dire que le comportement dynamique des indicateurs de performance est affiché visuellement pour s'assurer que les mesures de performance et le modèle se comportent correctement.
- *Analyse de sensibilité à la variabilité des paramètres* : Cette technique consiste à changer la valeur des entrées et des paramètres internes pour déterminer l'impact sur le comportement du modèle ou les sorties. Les mêmes relations que dans le système réel devraient se produire dans le modèle. Cette technique peut être utilisée qualitativement – direction de la variation des sorties seulement – ou quantitativement – les deux directions et l'amplitude (précise) de la variation des sorties. Les paramètres qui sont sensibles, c'est-à-dire qui cause des variations importantes du

comportement du modèle ou des sorties, devrait être suffisamment affinés avant d'utiliser le modèle. [...]

- *Philosophie des méthodes scientifiques*: Les trois philosophies de méthodes scientifiques sont le rationalisme, l'empirisme et l'économie positive. Le rationalisme requiert qu'un modèle soit développé logiquement depuis une série d'hypothèses clairement formulées. L'empirisme requiert que toute hypothèse du modèle et tout résultat soit validé expérimentalement. L'économie positive requiert seulement que tous les résultats du modèle soient corrects et ne s'occupe pas des hypothèses ou de la structure du modèle.
- *Validation prédictive*: Le modèle est utilisé pour prédire (prévoir) le comportement du système puis le comportement du système est comparé avec les prévisions du modèle pour déterminer s'ils sont identiques. Les données du système doivent venir d'un système opérationnel ou être obtenues en conduisant des expériences sur le système [...].
- *Revue structurée*: L'entité en révision est présentée formellement, généralement par le développeur à un groupe de pairs, pour déterminer la conformité de l'entité. [...]
- *Trace*: Le comportement d'un type spécifique d'entité est tracé (suivi) à travers le modèle pour déterminer si la logique du modèle est correcte et si la précision nécessaire est obtenue. (La plupart des logiciels de simulation courants fournissent une fonction de traçage ce qui rendant l'usage de la trace relativement simple.)
- *Test de Turing*: Il est demandé à des personnes connaissant bien les opérations du système modélisé s'ils peuvent différencier des sorties du système et du modèle. (Des analyses statistiques du test de Turing sont contenues dans Schruben (1980).)

Toutes ces méthodes se recoupant, il s'agit alors d'en utiliser une ou plusieurs suivant le type de système modélisé, la technique de développement employée et les moyens disponibles. Ce sont ces derniers qui limiteront le choix des techniques de validation. En effet, on choisira la méthode la plus efficace et la plus sûre possible afin de donner confiance à l'utilisateur du modèle ou le(s) destinataire(s) des résultats dans le modèle.

Plusieurs études ont pu démontrer l'utilité et la pertinence d'utiliser la Simulation à Événement Discret (SED) dans le cadre de la gestion de la production. Cette technologie sert notamment d'outil d'aide à la décision puisqu'elle permet de visualiser l'effet de modifications d'un système opérationnel sans impacter l'existant. Par exemple (Mohsenijam *et al.*, 2017) s'en servent pour pallier à des difficultés de planification et d'analyse de la production dans le cadre d'une entreprise fabricant des éléments préfabriqués pour des ouvrages de grande envergure tels que des ponts. En effet, des changements fréquents de

type de commande impliquent de modifier les installations, ce qui est source d'incertitude. La simulation permet de visualiser des détails opérationnels et donc de gagner en efficacité dans ces changements de séries. (Heravi & Firoozi, 2017) abondent dans ce sens en montrant dans une étude de cas que la SED peut être un outil d'aide à la décision dans le cadre de l'implémentation de principes Lean. La simulation est ici couplée avec une étude VSM (Value Stream Mapping – Cartographie de la chaîne de valeur) pour être plus pertinente. Dans le contexte d'installations modernes pour la construction industrialisée, (Altaf *et al.*, 2018) ont utilisé un système RFID (*Radio-Frequency Identification Device* – Appareil d'identification à radiofréquence) pour récolter un grand nombre de données qui, après traitement, ont été implémentées dans un modèle de simulation. Cela montre que la simulation seule n'est pas toujours suffisante et qu'elle peut être utilisée en complément d'autres outils. C'est ce que font (Piel *et al.*, 2018) pour optimiser un ensemble de zones de stockage d'une ligne de production au sein d'une usine automobile en France. Ils utilisent la simulation pour compléter un modèle d'optimisation combinatoire et évaluer plusieurs critères de performance.

2 Revue de la Littérature

Une partie de la revue de la littérature présentée ci-dessous a été intégrée dans un article scientifique présenté le 27 juin 2018 à la 12^e Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation (Mosim2018). Cet article est visible en annexe D de ce document. Elle vise à faire un état des lieux des connaissances et pratiques dans le domaine de la gestion de la production dans le secteur de la construction industrialisée.

2.1 Revue Systématique de la Littérature : Méthodologie

Comme l'explique (Tranfield *et al.*, 2003) une revue de littérature classique est souvent critiquée dans le monde scientifique. En effet, son manque de rigueur et la subjectivité du ou des chercheurs qui la mènent sont souvent pointés du doigt puisqu'il peut s'agir d'une source de biais non négligeable. Une revue systématique de la littérature apporte une solution à ce problème puisque c'est un processus défini comme reproductible, scientifique et transparent. Ainsi, trois étapes majeures sont identifiées et suivies.

2.1.1 Planifier la revue

Le but de cette étape est de bien définir le sujet. Il faut donc poser la problématique avec une ou plusieurs questions de recherche. Il faut aussi définir une stratégie de recherche en fixant des critères d'inclusion et d'exclusion.

Dans le cas de la présente recherche, le sujet a été restreint aux avantages/inconvénients des activités dites hors-site ainsi qu'à la gestion de la production de la construction préfabriquée. Ainsi les études liées directement au design des produits préfabriqués ont été écartées. Elles n'ont en effet que peu lieu d'être dans une étude de génie industriel et relèvent plutôt du génie civil.

Cinq questions de recherche ont été définies :

- Q1 : Quelle valeur présente les méthodes modernes de construction face à la construction traditionnelle ?
- Q2 : Quels sont les points de différenciation entre le secteur de la construction industrialisée et le secteur manufacturier ?

- Q3 : Quels sont les problèmes majeurs que rencontre l'industrie du préfabriqué ? Et s'il y a lieu, quelles sont les solutions proposées ?
- Q4 : Quels outils, équipements, moyens sont ou peuvent être mis en place pour supporter et conduire la production de structures préfabriquées ?
- Q5 : Quels sont les intérêts de l'utilisation du bois d'œuvre face à d'autres matériaux dans le secteur de la construction préfabriquée ?

Le choix des articles via les mots clés et l'analyse des papiers obtenus après tri permettront de faire la lumière sur ces questions.

2.1.2 Conduire la revue

Il s'agit à présent de trouver des mots clés et des termes de recherche en adéquation avec la problématique et la stratégie de recherche définies lors de l'étape précédente. Ainsi doivent ressortir uniquement les études correspondant aux critères inclusifs et n'étant pas concernés par les critères exclusifs. Ces études doivent pouvoir aider à trouver une réponse aux questions de la problématique.

En procédant par essais, de nombreux mots clés et combinaisons de mots clés ont été testés. Étant donné le sujet, des bases de données spécifiques ont été choisies. Les mots clés ont été testés à l'aide du moteur de recherche *Engineering Village* avec les bases de données *Compendex* et *Inspec*. Par la suite, la même série de mots clés a été soumise à la base de données *Web of Science*. Ces mots clés ont été cherchés dans le titre, le résumé ou le sujet référencé de chaque étude. La littérature scientifique du domaine étant principalement écrite en anglais, il était donc nécessaire d'utiliser des mots clés dans cette langue. Les termes de recherche retenus sont résumés dans le Tableau 1.

Chaque ensemble de termes de recherche (un par ligne du Tableau 1) est concaténé par l'opérateur logique « ET ». D'autres mots clés ont été testés, mais refusés. En effet, ils ne permettaient pas assez de cibler les articles intéressants et/ou d'éliminer les articles hors sujet.

Tableau 1 - Tableau récapitulatif des termes de recherche

Mots clés	Thème ciblé
"Modern Methods of Construction" OU "Industrialized Housing" OU "Modular Building Systems"	Construction préfabriquée
Manufactur* OU Production	Production
Process* OU (Factory OU Factories OU Facility OU Facilities OU Shop-Floor* OU Work-Floor* OU Plant*)	Études centrées sur le processus ou les opérations hors-site/en usine
Manag* OU Control*	Gestion des opérations

Les recherches ont débuté au 1^{er} mai 2017. Afin de rédiger ce document en le fondant sur une banque d'articles précis et sur des d'informations déterminées, il a fallu définir une date de fin des recherches. Cette date a été fixée au 5 septembre 2017. C'est pourquoi tous les articles utilisés dans cette revue de littérature font partie des articles obtenus une fois les mots clés soumis à la base de données entre ces deux dates.

Ainsi lorsque la série de termes de recherche a été soumise à *Engineering village*, 23 articles différents (28 avant retrait des doublons) sont ressortis. Ils sont énumérés dans le Tableau 2.

Tableau 2 - Liste des articles obtenus via "Engineering village"

Référence	Titre
(Taylor <i>et al.</i> , 2009)	<i>A comparison of modern methods of bathroom construction: A project case study</i>
(Armacost <i>et al.</i> , 1994)	<i>AHP framework for prioritizing customer requirements in QFD: An industrialized housing application</i>
(Hook & Stehn, 2008)	<i>Applicability of lean principles and practices in industrialized housing production</i>
(Bildsten <i>et al.</i> , 2010)	<i>Applying the kraljic model to the construction sector: The case of a prefab housing factory</i>
(Bildsten <i>et al.</i> , 2010)	<i>Automation technologies for the industrialized housing manufacturing industry</i>
(Nield-Dumper, 2005)	<i>Car parks - New structures</i>
(Goulding <i>et al.</i> , 2012)	<i>Construction industry offsite production: a virtual reality interactive training environment prototype</i>
(Armacost <i>et al.</i> , 1992)	<i>Customer requirements in industrialized housing</i>
(Johnsson & Meiling, 2009)	<i>Defects in offsite construction: Timber module prefabrication</i>
(Thuesen & Hvam, 2011)	<i>Efficient on-site construction: learning points from a German platform for housing</i>
(Nahmens & Bindroo, 2011)	<i>Is customization fruitful in industrialized homebuilding industry?</i>
(Noguchi, 2005)	<i>Japanese manufacturers' 'cost-performance' marketing strategy for the delivery of solar photovoltaic homes</i>
(Pan <i>et al.</i> , 2008)	<i>Leading UK housebuilders' utilization of offsite construction methods</i>
(Kozlovská & Spiaková, 2011)	<i>Modern methods of construction vs. construction waste</i>
(Sarden & Engstrom, 2010)	<i>Modern methods of construction: A solution for an industry characterized by uncertainty?</i>
(Lucas <i>et al.</i> , 2007)	<i>National energy savings potential in HUD-code housing from thermal envelope and HVAC equipment improvements</i>
(Busching, 1977)	<i>NEW EQUIPMENT OF PRODUCTION AND CONSTRUCTION TO DECREASE THE COST OF PUBLIC HOUSING.</i>
(Tennant <i>et al.</i> , 2012)	<i>Re-engineering the construction supply chain: Transferring on-site activity, offsite</i>
(Broadway & Mullens, 2004)	<i>Shop-floor information systems for industrialized housing production</i>
(Armacost <i>et al.</i> , 1994a)	<i>Structuring a simulation modeling environment using a commercial manufacturing simulator</i>
(Gan <i>et al.</i> , 2014)	<i>The discuss of the development of residential industrialization in the new period</i>
(Armacost <i>et al.</i> , 1994b)	<i>The role of object oriented CAD in a generic simulator for the industrialized housing industry</i>
(Hairstans, 2010)	<i>Timber offsite Modern Methods of Construction</i>

Sur la base des résumés (et des introductions et conclusions en cas de doute), les articles ont été filtrés. Tout article hors sujet a ainsi été retiré de la liste. Les articles traitant de design ou les articles dans une langue autre que l'anglais ou le français n'ont par ailleurs pas été traités. Il en résulte la série de 13 articles présentée dans le Tableau 3.

Tableau 3 - Liste des articles obtenus via "Engineering village" après filtrage

Référence	Titre
(Hook & Stehn, 2008)	Applicability of lean principles and practices in industrialized housing production
(Branson <i>et al.</i> , 1990)	Automation technologies for the industrialized housing manufacturing industry
(Broadway & Mullens, 2004)	Shop-floor information systems for industrialized housing production
(Kozlovska & Spiakova, 2011)	Modern methods of construction vs. construction waste
(Sarden & Engstrom, 2010)	Modern methods of construction: A solution for an industry characterized by uncertainty?
(Hairstans, 2010)	Timber offsite Modern Methods of Construction
(Johnsson & Meiling, 2009)	Defects in offsite construction: Timber module prefabrication
(Pan <i>et al.</i> , 2008)	Leading UK housebuilders' utilization of offsite construction methods
(Bildsten <i>et al.</i> , 2010)	Applying the kraljic model to the construction sector: The case of a prefab housing factory
(Noguchi, 2005)	Japanese manufacturers' 'cost-performance' marketing strategy for the delivery of solar photovoltaic homes
(Taylor <i>et al.</i> , 2009)	A comparison of modern methods of bathroom construction: A project case study
(Nahmens & Bindroo, 2011)	Is customization fruitful in industrialized homebuilding industry?
(Tennant <i>et al.</i> , 2012)	Re-engineering the construction supply chain : Transferring on-site activity, offsite

La même série de termes de recherche a été soumise à la base de données Web of Science. Par souci de cohérence, la recherche a été limitée aux index Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED), Conference Proceedings Citation Index- Science (CPCI-S) et Emerging Sources Citation Index (ESCI), les autres index étant consacrés aux sciences humaines et sociales. Ainsi la série d'articles du Tableau 4 a été obtenue. En suivant le même filtrage que celui décrit précédemment, seuls 2 articles (cf. Tableau 5) ont été retenus. Il s'agit d'articles déjà obtenus via Engineering Village.

Tableau 4 - Liste des articles obtenus via "Web of Science"

Référence	Titre
(Armacost <i>et al.</i> , 1994)	AHP framework for prioritizing customer requirements in QFD: An industrialized housing application
(Branson <i>et al.</i> , 1990)	Automation technologies for the industrialized housing manufacturing industry
(Nahmens & Bindroo, 2011)	Is customization fruitful in industrialized homebuilding industry?
(Goulding <i>et al.</i> , 2012)	Construction industry offsite production: a virtual reality interactive training environment prototype
(Lopez del Corral, 2009)	156 Industrialized houses in Vitoria-Gasteiz
(Cilento-Sarli, 1998)	Technological tendencies in the production of homes

Tableau 5 - Liste des articles obtenus via « Web of Science » après filtrage

Référence	Titre
(Branson <i>et al.</i> , 1990)	Automation technologies for the industrialized housing manufacturing industry
(Nahmens & Bindroo, 2011)	Is customization fruitful in industrialized homebuilding industry?

2.1.3 Analyse descriptive

Afin d'avoir une meilleure compréhension des études de cette revue, il est essentiel de connaître la période et le lieu géographique où l'étude a été menée. Il est aussi intéressant de savoir quelles études se sont concentrées sur la part de marché de la construction en bois. Ces paramètres sont rassemblés dans le Tableau 6.

La période de l'étude peut être simplement estimée par l'année de publication. Cela donne en effet une idée suffisamment précise de quand les recherches ont été menées puisque la publication constitue un jalon important (si ce n'est final) d'une étude. On peut constater que 10 des 13 études ont été publiées dans la dernière décennie, 2 dans celle d'avant et 1 seule il y a plus de 20 ans. Il s'agit donc d'un domaine de recherche récent. Cela peut expliquer le manque d'abondance d'études couvrant le domaine.

Deux paramètres géographiques sont pris en compte. Le premier est le lieu où l'étude a été menée, c'est-à-dire la position géographique du sujet de l'étude. Cela peut-être une entreprise ou un groupe d'entreprises, des études sur le secteur d'activité provenant d'un pays, etc. Cependant il est parfois impossible de déterminer ce paramètre, parce que l'étude est trop générale ou globale. Le second est la provenance de l'étude, c'est-à-dire le pays

de l'université d'où proviennent les chercheurs ayant réalisé cette étude. Les paramètres géographiques permettent d'identifier les pôles de compétence, mais aussi où se situent les besoins. En effet, les études répondent bien souvent à des besoins réels économiques d'un pays ou d'une région. De plus, elles s'appuient sur des données réelles récoltées sur le terrain. Il faut donc un secteur au minimum naissant pour avoir des données fiables. Ainsi, on observe ici que l'ensemble des études proviennent de pays riches de la triade, soit des pays ayant une économie fortement développée. De même, les lieux d'études, lorsqu'ils sont connus, sont tous dans des pays développés. On peut noter qu'en grande majorité, les études ont lieu dans leur pays de provenance. La forte demande en logement présente dans les pays industrialisés couplée avec les normes sanitaires et de sécurité élevées engendre un besoin de logements de qualité en grande quantité. Il est donc logique que ce soit des pays industrialisés qui cherchent à augmenter leur efficacité dans le secteur de la construction pour ainsi créer plus de logements en adéquation avec la demande.

Tableau 6 - Période et lieu et secteur des études composant la revue de littérature

Référence	Année	Lieu d'étude	Provenance	Construction Bois
(Höök & Stehn, 2008)	2008	Suède	Suède	Oui
(Branson <i>et al.</i> , 1990)	1990		É.-U.	Oui
(Broadway & Müllens, 2004)	2004	É.-U.	É.-U.	Oui
(Kozlovská & Spiáková, 2011)	2011		Slovaquie	Non
(Sardén & Engström, 2010)	2010	Suède & GB	Suède	Non
(Hairstans, 2010)	2010		GB	Oui
(Johnsson & Meiling, 2009)	2009	Suède	Suède	Oui
(Pan <i>et al.</i> , 2008)	2008	GB	GB	Non
(Bildsten <i>et al.</i> , 2010)	2010	Suède	Suède	Oui
(Noguchi, 2005)	2005	Japon	Canada	Non
(Taylor <i>et al.</i> , 2009)	2009	GB	GB	Non
(Nahmens & Bindroo, 2011)	2011	É.-U.	É.-U.	Non
(Tennant <i>et al.</i> , 2012)	2012	GB	GB	Non

Trois pays sont représentés à plusieurs reprises, les États-Unis, la Suède et le Royaume-Uni. Il est intéressant de noter que les deux premiers sont parmi les plus importants producteurs de bois d'œuvre au monde ("FAOSTAT," n.d.), alors que le dernier, en tant que berceau de la révolution industrielle, a une forte tradition de progrès industriel.

2.2 Revue systématique de la littérature : Analyse Thématique

Dans le but de présenter et de résumer l'information qui nous intéresse, le Tableau 7 recense les questions auxquelles chaque article apporte un élément de réponse. Nous pouvons ainsi observer que certaines questions ont plus été traitées que d'autres jusqu'à présent.

Tableau 7 - Table de recensement des réponses aux questions de recherche par article

Référence	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
(Taylor <i>et al.</i> , 2009)	X		X		
(Höök & Stehn, 2008)	X	X	X	X	
(Bildsten <i>et al.</i> , 2010)	X	X			
(Branson <i>et al.</i> , 1990)	X		X	X	
(Johnsson & Meiling, 2009)	X	X	X	X	
(Nahmens & Bindroo, 2011)	X		X	X	
(Noguchi, 2005)	X		X		X
(Pan <i>et al.</i> , 2008)	X		X	X	
(Kozlovská & Spiáková, 2011)	X				
(Sardén & Engström, 2010)	X		X		
(Tennant <i>et al.</i> , 2012)	X		X		
(Broadway & Müllens, 2004)		X		X	
(Hairstans, 2010)	X		X	X	X

2.2.1 Quelle valeur présente les méthodes modernes de construction face à la construction traditionnelle ?

Quasiment tous les articles explorés donnent des éléments de réponse à cette question. Comme montré dans l'analyse descriptive ci-dessus, les Méthodes Modernes de Construction (MMC) dont fait partie la construction industrialisée (IH – Industrialized Housing), aussi nommée préfabrication, constituent un sujet de recherche assez récent. Il est donc encore utile de démontrer l'intérêt que cela peut représenter pour les différentes parties prenantes. Certaines recherches (e.g., (Kozlovská & Spiáková, 2011)) sont même axées directement sur cet intérêt.

Tout d'abord, l'avancée majeure que permettent les MMC est la possibilité de standardiser une partie plus ou moins importante de la construction. Sur un plan général, il faut noter que

le fait de réaliser une partie des activités hors-site permet d'implémenter un flot de production et ainsi de passer d'un fonctionnement en mode projet vers un mode processus (Hairstans, 2010). (Sarden & Engstrom, 2010) d'ajouter que les processus permettent une coordination plus rationnelle et plus efficace entre les étapes de construction et entre les parties prenantes. (Branson *et al.*, 1990) soulignaient déjà une caractéristique importante pour permettre la standardisation, notamment via la technologie, soit la répétitivité des processus de production ramenés hors-site. La standardisation a de nombreux avantages. De manière générale, elle permet un meilleur contrôle de la production (Nahmens & Bindroo, 2011; Sarden & Engstrom, 2010), une plus grande prédictibilité (Pan *et al.*, 2008; Sarden & Engstrom, 2010) et un gain en vitesse de construction (Kozlovska & Spiakova, 2011; Pan *et al.*, 2008; Sarden & Engstrom, 2010). Enfin, le fonctionnement par processus apporte un avantage majeur puisque cela concentre les responsabilités sur un responsable de processus qui apportera un meilleur contrôle et une meilleure responsabilisation au client (Sarden & Engstrom, 2010).

(Noguchi, 2005) argue que les MMC rendent possible aujourd'hui de développer des principes de production par valeur ajoutée et d'obtenir des certifications industrielles multi-secteurs telles que ISO 9000, ISO 14000 ou d'autres. Par ailleurs (Hook & Stehn, 2008) montrent dans une étude dédiée que les principes du Lean management peuvent bien s'appliquer à la construction industrialisée.

Principalement en raison de la standardisation, les coûts afférents aux MMC sont moindres que ceux afférents aux méthodes traditionnelles. Pointé par (Taylor *et al.*, 2009), cette réduction est expliquée par des économies d'échelle par (Noguchi, 2005; Sarden & Engstrom, 2010). En effet, la centralisation et standardisation d'une partie des activités hors-site permet de regrouper certains produits et donc d'avoir un meilleur contrôle des coûts. (Sarden & Engstrom, 2010) poussent l'analyse plus loin en ajoutant que le retour sur investissement est donc plus rapide.

Une autre conséquence de la standardisation et du transport des activités hors-site est l'augmentation de la qualité des produits (Hairstans, 2010; Pan *et al.*, 2008; Taylor *et al.*, 2009). En effet, il y a plus d'opportunités de contrôle de la qualité, ce qui implique une diminution des rebuts en fréquence et en gravité (Johnsson & Meiling, 2009). La baisse des coûts facilite aussi le développement de stratégies de marketing basées sur la haute qualité des produits (Noguchi, 2005). Enfin (Sarden & Engstrom, 2010) notent qu'il y a une

uniformisation des normes qui sont ainsi moins contradictoires. En effet, les parties prenantes intervenant sur le projet sont bien moins nombreuses et il en va de même pour les normes de construction utilisées.

La transformation du travail qui est opérée dans ce transfert des opérations sur-site hors-site provoque une mutation des ressources nécessaires. Sur le plan technique, de nouvelles technologies sont nécessaires et l'utilisation de certaines autres technologies devient possible. Ce point sera détaillé plus tard notamment en répondant à la question 4. Sur le plan matériel, certaines matières premières deviennent plus facilement utilisables que d'autres et inversement, notamment à cause du transport qui est à prendre en considération (Hairstans, 2010). La question 5 abordera l'intérêt de l'utilisation du bois pour la construction hors-site. Sur un plan humain, la main-d'œuvre connaît aussi une importante modification. Les MMC requièrent moins de compétence de la part des opérateurs (Kozlovska & Spiakova, 2011; Pan *et al.*, 2008; Taylor *et al.*, 2009). En effet, le mode processus permet de découper et de simplifier les tâches de production. (Pan *et al.*, 2008) expliquent aussi que les MMC nécessitent une plus faible quantité de main d'œuvre. Cela permet ainsi de pallier au manque de main-d'œuvre auquel plusieurs pays font face.

Les ressources et méthodes de travail changeant, il est logique que les relations clients-fournisseurs soient aussi concernées par cette transformation. (Bildsten *et al.*, 2010) observent dans leur étude le développement des relations clients-fournisseurs à long terme. (Sarden & Engstrom, 2010) constatent pour leur part des relations moins conflictuelles entre acteurs et le développement d'intérêts communs. Il en résulte une meilleure coordination. Par ailleurs (Tennant *et al.*, 2012) expliquent que la spécialisation et le développement technique des activités de chaque partie prenante augmentent l'interdépendance commerciale, ce qui constitue un incitatif pour le développement de relations à long terme.

Enfin les MMC ont un avantage important par rapport aux méthodes traditionnelles qui prend de plus en plus de sens de nos jours. Elles semblent en effet être plus durables (Noguchi, 2005). Elles ont ainsi un impact plus modéré sur l'environnement (Pan *et al.*, 2008). (Kozlovska & Spiakova, 2011) y ont consacré une étude. Ils ont pu constater que, grâce à un meilleur contrôle des quantités et à de plus bas risques matériels, les déchets de construction sont diminués de moitié par rapport à la construction traditionnelle. Il est aussi mentionné que de meilleures techniques d'isolation (étanchéité, isolation thermique, isolation phonique, etc...) permettent des économies d'énergie lors du cycle de vie du

produit. Enfin, il y est expliqué que la centralisation des activités de construction hors-site réduit la multiplicité des transports.

Tableau 8 - Tableau récapitulatif des éléments de réponse à la question 1

Thème	Élément de réponse à la question 1
Standardisation	Implémentation d'un flot de production (mode processus) Implantation de technologies Meilleur contrôle de production, prédictibilité et rapidité accrues, plus grande responsabilisation
Production hors-site	Certifications industrielles (ISO) Lean management
Coûts	Économies d'échelle Retour sur Investissement plus rapide
Qualité	Contrôles accrus Moins de bris et défauts Uniformisation des normes
Main d'œuvre	Diminution des compétences nécessaires Effectifs plus faibles
Relations clients-fournisseurs	Relations à plus long-terme Relations moins conflictuelles, développement d'intérêts communs
Développement durable	Diminution des déchets Économies d'énergie lors du cycle de vie du produit Réduction des transports

Le Tableau 8 résume les grands éléments de réponse à cette question. Force est de constater que les MMC ont de nombreux points d'intérêts. Elles permettent notamment d'obtenir des produits de plus grande qualité, dans de plus brefs délais et à moindres coûts.

2.2.2 Quels sont les points de différenciation entre le secteur de la construction industrialisée et le secteur manufacturier ?

L'une des motivations des MMC est de faire connaître au monde de la construction le même essor qu'a pu connaître le secteur manufacturier à la fin du XXe siècle. Ceci est bien expliqué par (Gann, 1996) dans une étude hors revue. L'article compare l'IH au secteur manufacturier de l'automobile au Japon et montre qu'il y a de nombreuses similarités. Certaines d'entre elles sont pointées dans les articles de cette revue de littérature.

Tout d'abord, la construction présente une forte culture de projet qui sera toujours présente, au moins en toile de fond en raison des activités sur-site (Hook & Stehn, 2008). Ces

dernières constituent une différence majeure entre les deux secteurs qui ne sera naturellement jamais surmontable.

L'IH tend à se défaire de la tradition de stratégie d'approvisionnement à court terme qui est présente dans la construction traditionnelle. Ainsi des relations client-fournisseurs à long terme naissent de plus en plus. Cependant les MMC ne sont pas encore au niveau du secteur manufacturier en termes d'efficacité (Bildsten *et al.*, 2010).

Même si des progrès sont constatés sur le plan du contrôle de la qualité, les produits de la construction ont en général un degré d'unicité plus important que ceux du secteur manufacturier, c'est-à-dire que chaque produit a tendance à se distinguer des autres par certains détails propres à chaque produit. Les produits étant donc moins standards, les contrôles de qualité restent plus difficiles à réaliser (Johnsson & Meiling, 2009).

(Broadway & Mullens, 2004), quant à eux, notent que certaines formes de MMC comme la construction modulaire ne peuvent être gérées par l'intermédiaire d'un logiciel « Enterprise Ressources Planning » (ERP) à l'instar des industries manufacturières. En effet, dans cette forme de MMC, les opérateurs ne sont pas liés à une station de travail et sont mobiles d'un atelier à l'autre, ce qui rend impossible l'utilisation directe d'ERP classiques. Les entreprises de construction modulaire se voient donc obligées de développer leurs propres outils.

Le Tableau 9 donne les éléments de réponse à cette question. Il en ressort que les différences majeures sont dues au manque de maturité du secteur et surtout à la nature du produit, les bâtiments imposant de garder une certaine culture projet.

Tableau 9 - Tableau récapitulatif des éléments de réponse à la question 2

Thème	Élément de réponse à la question 2
Culture	Culture projet due aux activités sur site
Approvisionnement	Stratégie à plus court terme
Qualité	Plus difficile à contrôler : degré d'unicité plus important
Technologies	ERP non utilisables en construction modulaire

2.2.3 Quels sont les problèmes majeurs que rencontre l'industrie du préfabriqué ? Et s'il y a lieu, quelles sont les solutions proposées ?

Comme montré lors de l'analyse descriptive, les MMC ne présentent qu'un intérêt récent. C'est pourquoi il est intéressant de connaître les problèmes majeurs qui ont pu être recensés et leurs éventuelles solutions.

Tout d'abord il faut noter que le changement de paradigme que représente la transformation de l'industrie de la construction peut en soi être source de problèmes. (Hook & Stehn, 2008) pointent des éléments qui sont inhérents à la jeunesse du secteur et doivent être traités en priorité. Il s'agit de la forte culture de projet qui est un frein considérable, le manque de processus intégré d'assurance qualité et le manque de programme d'amélioration continue. (Pan *et al.*, 2008) notent la culture conservatrice des entreprises qui ont des difficultés à se défaire de la culture de projet ou encore le coût d'entrée sur le marché assez élevé. Le secteur étant très fragmenté, il y a beaucoup de petits entrepreneurs pour lesquels le coût d'entrée peut être difficilement surmontable. (Sarden & Engstrom, 2010) expliquent que même si les MMC réduisent certaines incertitudes dans les processus de production, notamment sur les paramètres de délais, de qualité et de coûts, de nouvelles incertitudes apparaissent. Elles sont principalement dues à la nouveauté des méthodes. En effet, d'un côté les clients ont moins de choix dans le design, moins de possibilités de modifications et de l'autre, les constructeurs font face à de nouveaux processus, de nouveaux besoins, de nouvelles pratiques et des prises de décisions plus précoces. L'étude avance que ces incertitudes s'estomperont simplement avec le temps.

Il semble aussi y avoir un manque de documentation, notamment au niveau des processus de prise de décision et des applications pratiques (Taylor *et al.*, 2009). (Pan *et al.*, 2008) relèvent un manque d'information et de conseil pour les entrepreneurs. Ce phénomène est dû en partie à la haute fragmentation du secteur. Ils préconisent de développer l'apprentissage organisationnel et d'investir dans la formation des gestionnaires. (Johnsson & Meiling, 2009) montrent qu'au sein même des entreprises, les informations disponibles sont peu, voire pas, exploitées. Elles devraient l'être afin de développer l'apprentissage organisationnel au sein de chaque entreprise et que cela se propage à l'ensemble de la chaîne logistique. Cela permettrait aussi de faire émerger des compétences propres aux MMC.

La transformation profonde du marché impose au producteur de développer de nouvelles stratégies. Ainsi la personnalisation du produit est une question essentielle. Il est difficile aujourd'hui pour chaque producteur de trouver le juste point de découplage entre la personnalisation et la standardisation. Il n'y a pas de solution réelle à ce problème, puisque chaque client a des attentes différentes (Nahmens & Bindroo, 2011). Par ailleurs, le préfabriqué souffre parfois d'une réputation peu glorifiante. En effet, les MMC sont souvent jugées à tort comme des solutions de mauvaise qualité, alors que les clients veulent des produits de haute qualité. (Noguchi, 2005) présente d'ailleurs une stratégie basée sur la haute qualité des produits, mais qui offre des prix raisonnables grâce aux économies d'échelle.

La capacité de production et la productivité des usines peuvent par ailleurs s'avérer limitées. Ceci est entre autres dû aux équipements et aux procédures peu performants. Ce problème peut être résolu en investissant dans des technologies adéquates. Cela pourra aussi contribuer à diminuer les coûts de main-d'œuvre (Branson *et al.*, 1990).

Il semble que les relations client-fournisseurs de la chaîne logistique demeurent encore trop à court terme et trop conflictuelles. Les auteurs insistent sur l'importance de davantage investir dans la chaîne logistique pour que le rapport de force soit remplacé par des relations de confiance et que les risques soient partagés entre les différents acteurs (Tennant *et al.*, 2012). Sur un plan beaucoup plus concret, le transport des produits jusqu'au site de construction peut être problématique. Il constitue en effet une source potentielle d'accident et de bris. Pour minimiser cela, (Hairstans, 2010) suggère de le prendre en compte dès la phase de design.

Le contrôle de la qualité ne semble pas être un réflexe dans le monde de la construction. En effet, celui-ci étant complexe à mettre en place dans le cadre de la construction traditionnelle, il est souvent oublié et ce défaut perdure dans la construction préfabriquée. Cela pourrait être aisément corrigé puisque (Johnsson & Meiling, 2009) mesurent dans une étude consacrée au sujet que la majorité des rebuts sont des rebuts d'usine. Cette même étude préconise la mise en place de processus de traitement des défauts afin de pallier à ce problème, l'idée étant de récupérer les rebuts pour apprendre des erreurs commises et créer ainsi une démarche d'amélioration continue.

Tableau 10 - Tableau récapitulatif des éléments de réponse à la question 3

Thème	Éléments de réponse à la question 3
Performance générale	<p><u>Problème</u> : Manque de développement des processus de gestion (assurance qualité, amélioration continue, ...)</p> <p><u>Solution</u> : N/A</p> <p><u>Problème</u> : Culture conservatrice (mode projet trop ancré)</p> <p><u>Solution</u> : N/A</p>
Documentation	<p><u>Problème</u> : Manque d'information et de conseil</p> <p><u>Solution</u> : Développement de l'apprentissage organisationnel et formation des gestionnaires</p>
Stratégie	<p><u>Problème</u> : Produits méconnus</p> <p><u>Solution</u> : Développement de nouvelles stratégies basées sur les atouts du préfabriqué</p>
Production	<p><u>Problème</u> : Faible capacité</p> <p><u>Solution</u> : Investir dans les nouvelles technologies</p>
Approvisionnement	<p><u>Problème</u> : Relations à trop court-terme</p> <p><u>Solution</u> : Partager les risques</p> <p><u>Problème</u> : Transport des produits ajoute du risque</p> <p><u>Solution</u> : Considérer le transport dès le design</p>
Qualité	<p><u>Problème</u> : Contrôles trop peu fréquents</p> <p><u>Solution</u> : Investir dans l'assurance qualité</p>

Le Tableau 10 récapitule les différents problèmes auxquels peuvent faire face les entreprises de la construction industrialisée et leurs éventuelles solutions. On y retrouve essentiellement des problèmes liés au caractère récent des MMC. Il est donc nécessaire d'investir fortement dans la recherche et le développement pour continuer d'améliorer notamment les processus de gestion.

2.2.4 Quels outils, équipements, moyens sont ou peuvent être mis en place pour supporter et conduire la production de structures préfabriquées ?

Il est question ici de savoir quelles technologies ou méthodes précises ont pu être mises en place dans les ateliers de fabrication.

Dans le cadre de la standardisation du travail et de la maintenance, les principes du Lean Manufacturing s'appliquent particulièrement bien, notamment dans un contexte de personnalisation de masse (Nahmens & Bindroo, 2011). Dans cette même vision, (Hook & Stehn, 2008) notent un point important qui est la responsabilisation des équipes de

production. Cela permet d'avoir des équipes plus motivées qui travailleront plus efficacement et de manière plus proactive.

Même si l'étude a plus de 25 ans aujourd'hui, (Branson *et al.*, 1990) recense les différentes technologies qui peuvent être mises en place dans les ateliers de construction industrialisée. Tout d'abord, il y a de nombreuses technologies d'automatisation comme des machines de coupe, des outils d'assemblage ou des appareils de manutention. Ensuite, il est possible de faire appel à la robotique qui a fait ses preuves dans d'autres domaines. Enfin, les technologies de l'information constituent une grande source d'outils techniques et de gestion, tout en permettant l'intégration de certaines fonctions, par exemple les programmes de Conception et de Fabrication Assistée par Ordinateur (CAO-FAO) intégrés. (Broadway & Mullens, 2004) encouragent aussi l'utilisation des technologies de l'information en présentant une alternative aux ERP dans le cadre de la construction modulaire.

Comme mentionné précédemment, l'implémentation de lignes de production permet de rendre les contrôles de qualité plus systématiques. De plus, la mise en place d'une documentation par produit peut être intéressante pour avoir un meilleur suivi lors de la production (Johnsson & Meiling, 2009). Par ailleurs, pour mieux contrôler la qualité, (Hairstans, 2010) conseille aux constructeurs de se conformer aux certifications et standards internationaux. Cela aura aussi la conséquence de répandre les pratiques.

De manière générale, quelle que soit l'innovation envisagée, (Pan *et al.*, 2008) préconisent l'utilisation d'études comparatives pour évaluer les possibilités avant de prendre des décisions définitives.

Tableau 11 - Tableau récapitulatif des éléments de réponse à la question 4

Thème	Élément de réponse
Processus/techniques de gestion	Lean Manufacturing Documentation de suivi par produit Assurance qualité
Matériel	Technologies d'automatisation Technologies de l'information Logiciels de design Intégration de certaines fonctions
Développement	Utilisation d'études comparatives

Le Tableau 11 nous permet de constater qu'il existe une multitude de possibilités de développement. En effet, selon les besoins, les entreprises ont le choix de prioriser le développement de leurs ressources matérielles ou de leurs processus et techniques de gestion.

2.2.5 Quels sont les intérêts de l'utilisation du bois d'œuvre face à d'autres matériaux dans le secteur de la construction préfabriquée ?

Le partenaire industriel de cette recherche étant une entreprise produisant des éléments de bâtiments préfabriqués en bois, il est intéressant de comprendre l'intérêt et le potentiel du bois dans la construction préfabriquée. Les articles recueillis ne permettent toutefois pas de fournir une réponse complète. En effet, seuls deux articles abordent le sujet. Pour mieux y répondre, il aurait fallu changer certains mots clés pour trouver d'autres articles, mais l'intérêt de la revue systématique de la littérature en aurait été perdu.

(Noguchi, 2005) soutient que le bois est un matériau durable. Combiné avec les MMC qui sont elles aussi durables, les produits résultants peuvent être considérés comme écologiques. Ces propos sont corroborés par (Hairstans, 2010) qui avance que pour produire du bois d'œuvre, il faut en moyenne 50% de l'énergie nécessaire à la production du béton et environ 1% de celle nécessaire à la production de l'acier.

(Hairstans, 2010) explique que le bois est un matériau facile d'utilisation hors-site pour ses caractéristiques physiques, mais aussi pour sa facilité d'approvisionnement. C'est un matériau très intéressant pour la construction de manière plus générale. En effet, il est très résistant et réagit bien aux sollicitations externes. Il est souvent critiqué pour sa faiblesse face au feu, mais de nos jours, ce problème se résout très bien de différentes manières. L'étude cite notamment les traitements chimiques.

Le bois est donc intéressant pour son côté écologique, mais aussi pour ses caractéristiques techniques et sa facilité d'approvisionnement dans certaines régions du globe.

2.3 Littérature grise

À travers l'objectif d'optimisation des moyens de production pour la construction préfabriquée en bois est sous-entendue l'automatisation complète ou partielle d'équipements de production. En effet, cette option permet de pallier au manque de main-d'œuvre et à une augmentation de la demande auxquels font face des entreprises telles que celle partenaire de cette étude. De plus, l'automatisation apporte plusieurs avantages. Parmi ces derniers, on retrouve la réduction de la difficulté du travail et ainsi la diminution des risques en termes de santé et de sécurité pour les employés. Des équipements modernes permettent aussi l'augmentation des capacités de production et un gain en efficacité dus à la rapidité de travail accrue que cela représente, tout en assurant une production de meilleure qualité puisqu'il y a un gain en précision.

Il ne faut pas oublier cependant qu'il existe un certain coût d'investissement pour pouvoir automatiser tout ou une partie du plancher de production. De plus, la variabilité des produits complexifie grandement l'automatisation et en augmente le coût. Avant de passer à l'acte, une étude de l'existant et des simulations selon différents scénarios sont souvent recommandées afin de pouvoir choisir une option adéquate et d'en tirer le meilleur bénéfice possible.

L'entreprise partenaire de ce projet produit différents éléments préfabriqués. Il existe donc différentes lignes de production, chacune ayant un certain niveau d'automatisation et une certaine capacité à répondre à la demande. Afin de ne pas se disperser, seule une partie de la production de cette entreprise a été choisie. Ce choix sera justifié après avoir présenté en détail l'entreprise et ses activités dans le chapitre suivant (cf. 3 Cas d'études). Il s'agit de l'assemblage des panneaux de murs. Cette activité représente en effet une plus grande part de marché et la chaîne de production correspondante a une plus grande perspective d'amélioration. C'est donc sur les équipements correspondant à cet atelier de production en particulier que le reste de la revue de la littérature se focalisera.

2.3.1 Méthode de recherche

Ainsi une recherche parmi les principaux équipementiers de la préfabrication bois a été faite. Il peut être très difficile d'être exhaustif sur ce sujet, il a donc fallu trouver un éventail d'entreprises le plus complet possible. Les recherches ont été ciblées sur la liste des

entreprises exposant à la dernière édition de deux grands salons reconnus de la construction, BCMC (“2017 Exhibitors | BCMC Show,” n.d.) et LIGNA Hannover (“Search for Exhibitors and Products,” n.d.). Selon Sylvain Ménard, co-directeur de cette maîtrise, et ancien directeur des opérations d’une entreprise du secteur, ces deux salons regroupent la plupart des grands équipementiers du secteur. La liste des exposants constitue donc un éventail assez représentatif de l’ensemble des équipementiers. La liste a été complétée en regardant les publicités visibles dans (“SBC Magazine,” 2017a; “SBC Magazine,” 2017b), une revue spécialisée dans la production de composants structuraux de construction. Les informations ont été recueillies sur les sites internet de chacune des entreprises de cette liste. Pour chacune, la liste des équipements disponibles et leur application a été consulté afin de savoir quelle entreprise serait apte à fournir du matériel adéquat et surtout afin de savoir quel type de matériel est disponible sur le marché.

2.3.2 Résultats et discussion

Dans cette section, les résultats sont présentés à l’aide de deux tableaux. Le Tableau 12 présente les équipementiers recensés tout en précisant s’ils fournissent des équipements pour la production de panneaux de murs ou pas. Le Tableau 13 introduit plutôt des précisions sur l’application des équipements proposés. Seuls les équipementiers fournissant des équipements pour la production de panneaux de murs sont intégrés dans ce second tableau.

Nous pouvons constater dans le Tableau 12 que tous les équipementiers ne fabriquent pas des machines permettant de produire des panneaux de murs. Beaucoup ne proposent des produits que pour les fermes de toits et les scies hautes-performances.

Il y a tout de même une dizaine d’entreprises proposant des machines plus ou moins pertinentes pour ce processus industriel. Le Tableau 13 détaille le type d’équipement proposé par chaque équipementier.

Tableau 12 - Tableau récapitulatif des recherches d'équipementiers

Équipementier	Murs	Site internet / Source d'information
Automatisation Service Innovation (ASI)	Oui	("Équipements industriels et procédés automatisés uniques | ASI Innovation," n.d.)
Alpine	Non	("Alpine – Products," n.d.)
Monet DeSaww	Oui	("Products," n.d.)
Koskovich (MiTek)	Oui	("The Koskovich Company," n.d.)
TCT automation	Non	("tctautomationllc | OTHER MACHINES," n.d.)
Homag	Oui	(HOMAG, n.d.)
Materio	Non	("Matériaux pour construire et rénover une maison | Matério," n.d.)
Lissmac	Oui	("Plant-Engineering - Prefabricated wooden house," n.d.)
Clark Industries, Inc.	Non	("Clark Industries, Inc. Wood Truss and Component Manufacturing Equipment," n.d.)
Hundegger	Non	("Hundegger Woodworking Machines," n.d.)
MiTek	Oui	("Wall Panel Products," n.d.)
Panels plus	Oui	("COMPONENT BUILDERS," n.d.)
Square 1 Design & Manufacture /Spida	Oui	("Square 1 Design & Manufacture Inc.," n.d.-a)
Square 1 Design & Manufacture /MangoTech		("Square 1 Design & Manufacture Inc.," n.d.-b)
Stiles Machinery Inc.	Oui	("Structural Framing: Construction: Framing & Assembly | Stiles Machinery," n.d.)
Triad	Oui	("Wood Wall Panel Machinery - Triad Machines," n.d.)
Williams Robotics Inc	Oui	("Building Homes with Robots," n.d.)
iN4 Solutions, Inc	Non	("iN4 Solutions, Inc.," n.d.)
Vekta USA	Non	("Home," n.d.)
Wescana Industries Inc.	Non	("Wescana Industries - Welcome," n.d.)
Alphamatic Maschinenbau	Non	("ALPHAMATIC Maschinenbau GmbH," n.d.)
Italpresse	Non	("»» ITALPRESSE," n.d.)
Wegoma	Non	("Produkte - Wegoma," n.d.)
Wieder Mashinenbau	Non	("Products – Wieder Maschinenbau – Veneer and Briquetting Presses | Scissor lifts," n.d.)

Il est intéressant d'observer que la majorité propose au moins une solution d'automatisation de l'assemblage de la structure. Il s'agit d'une partie assez standard, il faut poser les lisses, puis entre chacune, poser des goujons à intervalle régulier. Si des ouvertures s'ajoutent,

cela complique les choses, mais les machines peuvent s'adapter et des postes de pré-assemblage pour les ouvertures peuvent être installés. L'assemblage du cadre est donc l'une des étapes les plus faciles à automatiser.

Tableau 13 - Tableau récapitulatif des types d'équipements proposés par équipementiers

Marque	Pré-assemblage composants	Assemblage structure	Revêtement - Équerrage	Indicateurs visuels	Ligne complète
Automatisation Service Innovation (ASI)		X	X		
Monet DeSauw		X	X		
Homag		X			X
Lissmac		X	X		
MiTek	X	X	X	X	
Panels plus	X	X	X		
Square 1 Design & Manufacture /Spida	X	X			
Square 1 Design & Manufacture /MangoTech	X	X			
Stiles Machinery Inc.	X	X	X		
Triad	X	X	X	X	
Williams Robotics Inc					X

Les étapes d'équerrage et de pose de revêtement ou de pré-assemblage de sous-composants semblent aussi présenter un certain intérêt d'automatisation. L'équerrage consiste à vérifier la perpendicularité des lisses, voire poser une pièce de bois transversale pour imposer cette perpendicularité. Le pré-assemblage des sous-composants concerne principalement le pré-assemblage des ouvertures ou des goujons avec leurs supports en sortie de scie. Ces étapes sont intéressantes, mais elles demandent une certaine discrétisation de la ligne de production. Elles impliquent en effet l'ajout éventuel d'une étape de production. Cela peut toutefois être intéressant pour pallier à un goulot d'étranglement dans le flux de production.

Certaines entreprises proposent des outils d'aide visuelle tels que des lasers. Ce n'est pas de l'automatisation à proprement parlé, mais il s'agit là d'outils très intéressants puisqu'ils peuvent aider la main-d'œuvre à être plus efficace et à faire moins d'erreurs.

Enfin, des machines ou robots permettant l'automatisation de la chaîne de montage au complet sont proposés. Ces derniers sont plus complexes à intégrer, car ils demandent une forte standardisation de la production, ils impliquent une réduction drastique de la main-d'œuvre pour des usines déjà implantées et ils représentent un investissement très élevé.

Il existe au sein de chaque catégorie, différents produits avec différents degrés d'automatisation. Certains ne sont que des équipements d'appui pour que la main-d'œuvre ait moins d'effort physique à faire et que le travail soit réalisé plus rapidement, tandis que certains sont des machines quasi autonomes qui de surcroît permettent de réduire la main-d'œuvre. Certains constructeurs offrent également à l'occasion différentes options au sein d'une même catégorie.

Avant d'aller plus loin dans le choix de l'équipement, il demeure nécessaire de caractériser le besoin de manière précise et d'évaluer l'existant pour avoir une bonne base de travail. En effet, il faut avoir une connaissance assez pointue de l'existant pour pouvoir caractériser le gain que cela peut représenter d'installer de telles machines. Par exemple si la main-d'œuvre est abondante et peu onéreuse, il peut alors être préférable d'opter pour des appareils mécaniques plutôt que pour d'autres complètement automatisés. Il n'y a cependant pas que la disponibilité de la main-d'œuvre à prendre en compte. Il faut aussi étudier la demande sur un horizon donné afin de déterminer si les quantités produites par rapport au degré de personnalisation de la production sont en adéquation avec le niveau d'automatisation que chaque machine représente. Par ailleurs, il faut bien évidemment prendre en compte la configuration des lieux. Et enfin, il faut aussi prendre en compte l'ordonnancement de l'atelier. Modifier simplement l'ordre d'exécution des tâches peut avoir un impact important sur les performances d'une production. Il faut que les machines envisagées soient une solution ad hoc et qu'elles ne créent pas plus de problèmes qu'elles n'en résolvent.

Cette revue de la littérature a donc permis de présenter le secteur de la construction industrialisée. Il a été comparé aux secteurs de la construction traditionnelle ainsi qu'au secteur manufacturier puis les problèmes majeurs auxquels font face les entreprises de ce secteur et leurs solutions si disponibles ont pu être relevés. Elle a été complétée par une revue de la littérature grise investiguant les systèmes d'automatisation ou de support à la production des panneaux de murs. Cela aidera notamment par la suite à mener une étude

de cas se focalisant sur la production de ces produits. Il s'agira alors d'étudier des voies d'améliorations impliquant notamment l'utilisation de telles machines.

3 Cas d'études

Cette section vise à confronter les connaissances et pratiques relevées dans la revue de la littérature à un cas concret pour parvenir à proposer des possibilités d'amélioration pour ce même cas. Pour ce faire, un partenariat a été établi entre l'entreprise *Structures Ultratec* et le CIRCERB, et c'est dans le cadre de ce partenariat que le projet a pu être mené.

3.1 Présentation de l'entreprise

Structure Ultratec œuvre dans le domaine de la construction préfabriquée depuis plus de 20 ans. Elle possède à l'heure actuelle 3 usines et un bureau de vente. Les 3 usines sont situées à Laurier-Station et à Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier au Québec ainsi qu'à Boscawen au New-Hampshire, aux États-Unis. Le bureau de vente est situé à Québec. L'entreprise offre ses services pour 4 types de bâtiment : résidentiels, multi-logements, commerciaux et agricoles. Elle couvre les activités de la conception des produits jusqu'à leur distribution sur les différents chantiers de ses clients, mais ne se charge cependant pas de l'assemblage des éléments préfabriqués sur site.

L'entreprise fabrique des poutres, des poutrelles de plancher, des fermes de toit et des panneaux de murs. Dès le début du projet, il a été décidé de s'intéresser plus précisément aux fermes de toit ou aux panneaux de murs. En effet, ces deux produits sont clés, car ils sont plus compliqués à produire et constituent une activité très lucrative pour l'entreprise. Il a donc été essentiel dans un premier temps d'étudier l'ensemble des processus de production de ces deux produits, de la coupe du bois jusqu'au chargement de ces produits avant livraison, à l'aide de diagrammes d'activités (les diagrammes qui ne sont pas présentés dans la section suivante sont visibles en annexe A.2). Les diagrammes ont permis de distinguer 3 ateliers principaux pour la fabrication des produits, soit l'atelier de coupe, l'atelier des fermes de toit et l'atelier des panneaux de murs. C'est au sein de l'atelier de coupe que la matière première principale, le bois d'œuvre, est coupé aux bonnes dimensions et séparé en lots afin d'être acheminé aux ateliers suivants. En effet, cet atelier est situé en amont des ateliers de production des fermes de toit et des panneaux de murs. L'atelier des fermes de toit consiste en l'assemblage des fermes de toit et à leur regroupement en lots pour être ensuite livré au client. Enfin l'atelier des panneaux de murs est celui de la fabrication des panneaux de murs et de leur regroupement en lots avant

livraison aux clients. Il s'agit de l'atelier qui a été choisi pour poursuivre l'étude. Les raisons de ce choix ainsi que le fonctionnement de cet atelier seront détaillés dans le prochain paragraphe. Après fabrication, les panneaux de murs et/ou les fermes de toits sont assemblés en lots sur des remorques. Les lots sont emballés afin d'être protégés des intempéries ou de tout autre aléa lors de la livraison. Cependant, cette étape ne correspondant pas au même niveau de détail que les tâches en atelier, elle n'est donc pas considérée dans les diagrammes de processus ni dans le reste de l'étude.

Ces observations ont pu être faites dans un premier temps dans les usines de Laurier-Station (LS) et de Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier (SC). Hormis la disposition des équipements, ces deux usines sont très semblables et elles produisent les mêmes produits. Pour éviter d'ajouter de la complexité inutilement dans ce projet, il a donc été choisi de se pencher sur l'usine de SC. Selon Ultratec, cette usine a de meilleures perspectives d'avenir. Les possibilités de modification de l'aménagement et d'agrandissement sont plus importantes. De plus, le marché de l'emploi local serait plus favorable. L'un des objectifs étant de proposer des améliorations de l'atelier de fabrication, il est donc plus intéressant et plus logique de fonder cette étude sur l'usine de SC.

3.2 Modélisation du processus

Cette étude de cas a donc mené à modéliser le processus de production de panneaux de murs. Ce processus est actuellement peu automatisé, alors que la demande pour le produit est en hausse. Il s'agit donc d'un processus nécessitant une augmentation en efficacité. Le manque d'efficacité est à première vue dû au manque de main-d'œuvre et d'automatisation.

Afin de modéliser ce processus, il a fallu faire appel à des documents et aller sur le plancher de production pour observer les différentes tâches effectuées par les opérateurs tout en interrogeant certains employés. Les documents récoltés correspondaient à l'historique de production des 3 dernières années. Les informations relevées lors des observations de chaque étape de production étaient les suivantes :

- L'enchaînement des tâches et leur explication ;
- Les caractéristiques de chaque tâche (est-elle systématique ou spécifique à un type de produit particulier ?) ;

- Le nombre et le rôle des opérateurs pour chaque tâche ;
- Les temps standards de production.

Les temps standards ont été fournis par l'entreprise et aucune mesure de temps n'a eu à être menée sur le terrain. Ces temps sont fournis sous la forme d'une moyenne, mais aucun estimé de la variance n'y est associé.

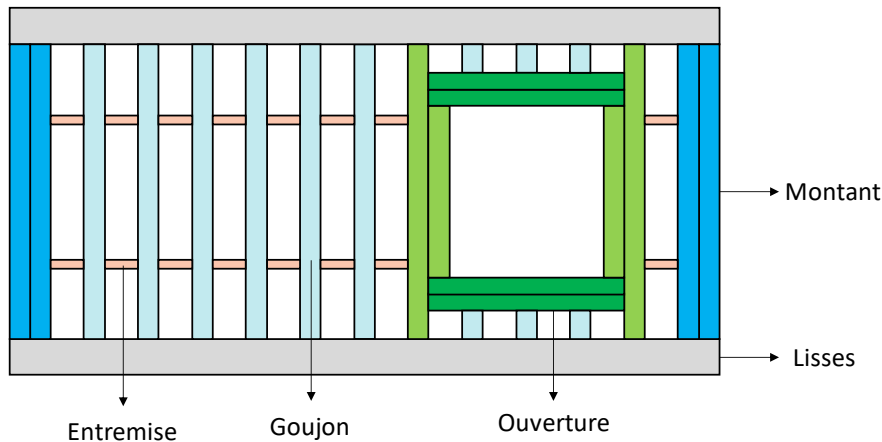


Figure 2 - Schéma en deux dimensions de la structure type d'un panneau de mur

Avant de présenter le processus en tant que tel, il est important de présenter la constitution d'un panneau de mur. On peut voir sur la Figure 2 un schéma en deux dimensions de l'ossature en bois. Il s'agit d'une structure type puisque chaque panneau de mur est différent. Dans les éléments principaux, on distingue donc les montants, qui peuvent être des poteaux, coins ou joints, l'ouverture, qui peut être une fenêtre ou une porte, et les lisses, les goujons et les entremises. À cette ossature, il peut s'ajouter d'un côté un revêtement rigide (en OSB, gypse, etc...) ainsi qu'un pare-air (*Tyvek* ou autre). Sur la face extérieure, des lattes en bois sont posées. De l'isolant pourra être ajouté dans les trous que forme l'ossature du panneau. Enfin, du côté encore ouvert, un second revêtement peut être ajouté. Un panneau constitué uniquement de sa structure et éventuellement d'un revêtement est appelé « panneau de mur creux ». Un panneau isolé est appelé « panneau de mur isolé ».

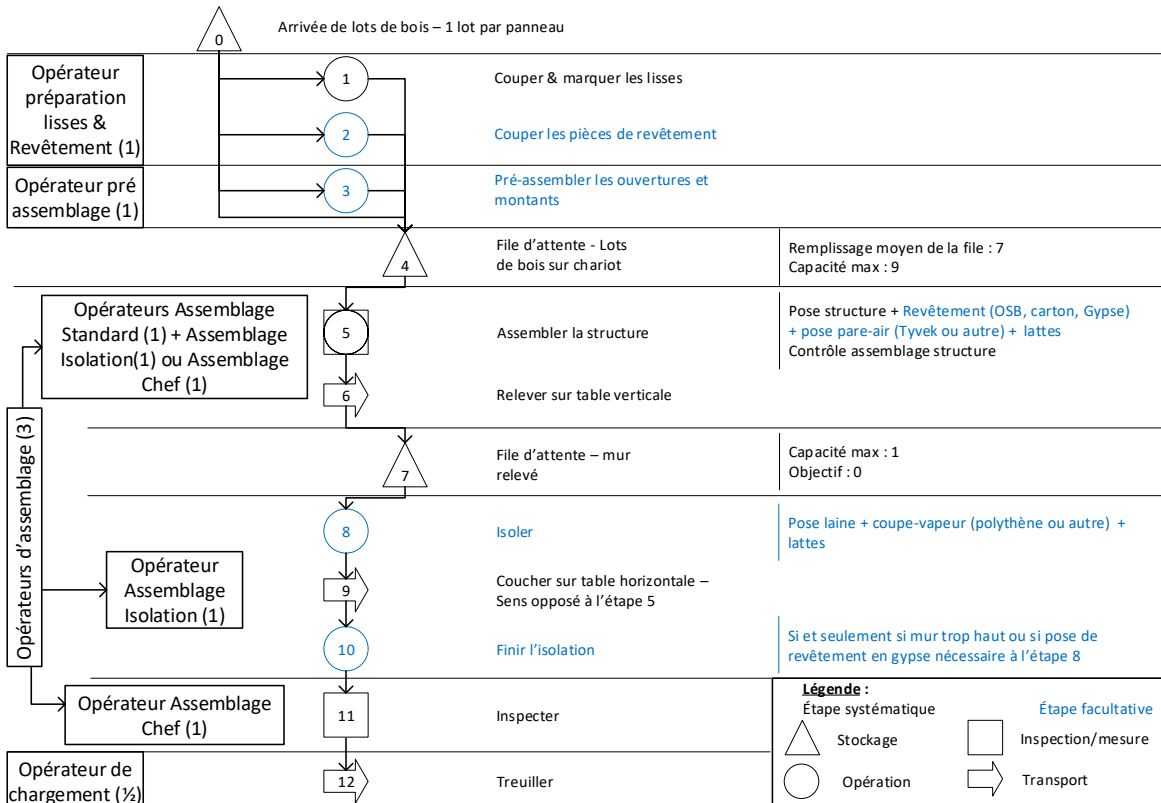


Figure 3 - Processus de production – Assemblage des panneaux de murs

À partir des documents et des observations sur le terrain, le diagramme de la Figure 3 a pu être réalisé pour refléter le mode de production de panneaux de murs de l'entreprise. Il s'agit d'un processus d'assemblage classique pour ce type de produit. L'atelier d'assemblage des panneaux de murs reçoit l'ensemble des pièces de bois composant le panneau de mur de la part de l'atelier de coupe (0), sauf les lisses et le revêtement. Dans un premier temps, il y a trois postes de préparation. La coupe et le marquage des lisses (1), la coupe du revêtement (2) et le pré-assemblage des éléments de cadre d'ouvertures et de montants (3). Les lisses sont les pièces constituant les parties supérieures et inférieures du cadre du panneau de mur. Le marquage permet de marquer sur le bois la position des goujons, pièces perpendiculaires aux lisses. Dans un second temps a lieu l'assemblage en lui-même. Il est très important de noter qu'à partir de l'assemblage de la structure (5), il y a deux lignes de production distinctes. Les tables pivotent pour pouvoir relever un panneau contre un plan vertical puis passer à l'étape d'isolation (8). Le panneau est ensuite couché dans l'autre sens sur une autre table pivotante. Dans certains cas, il est nécessaire d'effectuer des finitions (10) qui n'ont pu être faites à la verticale, soit parce que le panneau de mur est trop haut, soit parce que le revêtement se pose difficilement à la verticale (par exemple, le gypse). En dernier lieu, une inspection (11) du panneau de mur est faite. Sur la gauche du

diagramme, on voit apparaître la main-d'œuvre nécessaire à la conduite des tâches. Les tâches 1 et 2 par exemple sont réalisées par un seul opérateur.

Le diagramme d'activités visible à la Figure 3 présente les opérations globales de chaque poste de production. Des diagrammes détaillés, visibles en annexe A.1, ont ensuite été conçus pour pouvoir venir préciser les temps de production de chaque opération. Ces détails ont leur importance puisque toutes les tâches ne sont pas obligatoires. En effet, notamment au niveau de l'assemblage de la structure, dans le cas d'un panneau de mur creux sans revêtement, aucun revêtement n'est posé. Ainsi toutes les tâches de production ne sont pas prises en comptes dans le calcul des temps de production. Ce calcul sera détaillé dans le chapitre suivant (Section 4.1.2).

3.3 Problèmes observés

Plusieurs visites sur site ont permis de relever des problèmes majeurs auxquels l'entreprise fait face. Ces problèmes ont pour la plupart déjà été observés et soulevés par différentes études mentionnées dans la revue de la littérature.

Tout d'abord, l'atelier d'assemblage des panneaux de murs n'est pas automatisé. En effet, aucune machine ne permet de réaliser une tâche, partiellement ou complètement, de manière automatique. Par ailleurs, il n'y a aucune centralisation de l'information. Par exemple, il existe différents outils de gestion des inventaires selon les matières premières utilisées (plaques, bois, etc...). Cela reflète un manque d'automatisation et d'utilisation des nouvelles technologies tel que mentionné dans la littérature scientifique ((Branson *et al.*, 1990) et (Broadway & Mullens, 2004)).

Ensuite, la main-d'œuvre est manquante, alors que les opérateurs en place sont parfois démotivés et certains cumulent les absences. De plus, les accidents ou incidents sont fréquents. Cela peut être causé en partie par un manque de rigueur dans le rangement des ateliers de production ou encore par le fait qu'aucun mode opératoire ni aucune procédure écrite sur les méthodes de travail n'existent. De tels documents sont pourtant essentiels pour endiguer les mauvaises habitudes ou les déviations par rapport à la conformité des produits. Sur le plancher de production, la main-d'œuvre n'a pas accès à ses performances de travail via des indicateurs visibles. Il y a donc un manque de documentation et d'utilisation

des données disponibles. C'est ce que dénotait (Johnsson & Meiling, 2009) avant de prôner l'apprentissage organisationnel.

Par ailleurs, l'ordonnancement de la production au niveau des usines est fait suivant la valeur des produits (ou prix de vente) et leur date de livraison. C'est une méthode biaisée, car dans les faits, la valeur des panneaux de murs n'est pas uniquement indexée sur le temps de travail nécessaire à leur production. Par exemple, la valeur de chaque panneau de mur prend aussi en compte le prix des matériaux utilisés. Donc, à valeur égale, deux panneaux de murs peuvent avoir des temps de production très différents, et inversement. Ainsi, il peut y avoir un manque de travail disponible dans certains ateliers ou encore un surplus de travail qui engendre des retards. De plus, au sein de l'atelier de production, l'ordonnancement se fait à la date prévue de livraison, c'est-à-dire que dès qu'une table d'assemblage est disponible, le prochain panneau dans la liste des livraisons planifiées est attribué à cette même table, peu importe le produit considéré.

Enfin, on peut noter que les relations avec les fournisseurs sont peu développées, ce qui entraîne des difficultés au niveau de l'approvisionnement. Ce problème peut être relié au manque de rigueur dans la gestion des inventaires susmentionné. Le faible développement des relations avec les fournisseurs est souvent pointé comme cause du manque de standardisation dans le secteur de la construction industrialisé. En effet, pour avoir des produits standards, ne serait-ce qu'au niveau de la qualité, il est nécessaire d'avoir des matières premières standards, ce qui nécessite une constance dans le choix des fournisseurs (Tennant *et al.*, 2012). C'est un point d'amélioration pour l'entreprise puisque pour certains matériaux, elle fait appel à différents fournisseurs sans régularité apparente.

3.4 Proposition d'améliorations

Après une étude en détail du processus de production des panneaux de murs, un ensemble de cinq améliorations a pu être proposé. Elles peuvent toutes être appliquées seules, mais rien n'empêche d'en combiner certaines pour peut-être obtenir de meilleurs résultats. Ces améliorations ne visent que le processus de production en lui-même et ont pour but principal d'augmenter l'efficacité de la production. Tous les problèmes cités ci-dessus, bien que connexes à la gestion de la production et pouvant avoir un impact important sur l'efficacité, ne seront donc pas forcément traités.

Ces améliorations ont déjà été proposées dans un article scientifique présenté le 27 juin 2018 à la 12^e Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation (Mosim2018). Cependant, l'article ayant été soumis en décembre 2017, des modifications ont pu être apportées. En effet, un approfondissement des recherches sur les équipements disponibles, des discussions avec les équipementiers et des réflexions sur les possibilités d'implémentation de ces améliorations dans le modèle de simulation dont il sera question dans le chapitre suivant ont amené à revoir certaines propositions.

3.4.1 Description et impact

Pour chaque amélioration, l'idée générale et les impacts qu'elles peuvent avoir sur le processus sont ici détaillés.

Famille de produits : La demande actuelle n'est pas fixe dans le temps. En effet, selon la période de l'année, ce n'est pas le même marché qui est visé. Il y a donc une alternance entre l'été où des panneaux de murs isolés sont produits et l'hiver où des panneaux de murs creux sont plutôt produits. Il pourrait donc être intéressant lors des périodes transitoires d'opter pour deux lignes de production distinctes, l'une pour panneaux de murs isolés, l'autre pour panneaux de murs creux. L'entreprise possède déjà ces deux lignes, il suffirait de les distinguer en modifiant l'ordonnancement pour permettre de garder des flux tendus lors de ces périodes transitoires et être ainsi plus efficace.

Guides lasers : Cette solution consiste à poser des viseurs lasers à la verticale du poste d'assemblage structure (5) pour faciliter la pose des différentes pièces et réduire la nécessité de plans papiers. Cet outil permet d'indiquer sur la table d'assemblage, à l'aide de pointeurs, les positions des pièces à assembler. Plusieurs viseurs sont toutefois nécessaires pour éviter les erreurs de lecture liées à l'incidence des faisceaux lasers. Cela permettrait aux opérateurs de travailler plus rapidement et le risque d'erreur à ce poste serait plus faible. De plus, les contrôles de qualité seraient facilités. En effet, le marquage des lisses couplé aux viseurs lasers n'imposerait plus de sortir le mètre à mesurer pour contrôler les bonnes dimensions des pièces pour chaque panneau.

Écrans de guidage : Cette amélioration consiste à poser des écrans en hauteur pour permettre aux employés de visualiser le travail à effectuer étape par étape, sans avoir recours à des plans papier aux étapes de pré-assemblage des ouvertures (3) et

d'assemblage de la structure (5). Cette amélioration permettrait un gain de temps et une baisse du risque d'erreur.

Table de pré-assemblage : À l'heure actuelle, seuls les montants et linteaux des ouvertures sont préparés séparément sur un établi. L'installation d'une table de pré-assemblage permettrait de préparer des ouvertures de manière plus complète, c'est-à-dire des cadres complets. Cette solution représente un transfert de la charge de travail d'un poste potentiellement goulot, l'assemblage de la structure (5), à un autre, le pré-assemblage des ouvertures (3), ce qui équilibrerait mieux la production.

Poste de préparation des entremises : Les entremises sont coupées au fur et à mesure qu'elles sont posées. La création d'un poste de préparation supplémentaire permettrait de gagner en efficacité sur le poste d'assemblage de la structure (5) en y réduisant la charge de travail. Les tâches sur ce poste consisteraient à couper les entremises à la bonne dimension et à assembler une ou plusieurs entremises (selon la hauteur du panneau) avec un goujon. Ainsi au poste d'assemblage, les opérateurs positionneraient directement les ensembles goujon et entremise(s) déjà pré-assemblés. Cette modification ne réduit pas le temps de travail, mais le discrétise. Il faut donc faire attention à utiliser la main-d'œuvre ayant un taux d'occupation faible pour ne pas créer de goulot d'étranglement dans le processus de production.

Automate d'assemblage : Il s'agit ici d'automatiser partiellement le poste d'assemblage de la structure (5). Un automate permettrait de réaliser à partir des plans l'assemblage de la plupart des structures. À l'aide de pinces et de cloueuses, l'automate assemble les pièces de bois positionnées par un opérateur. Il existe plusieurs modèles sur le marché. Certains plus complexes sont aussi équipés de butés pour positionner les pièces et d'écrans de contrôle pour aider l'opérateur dans sa tâche. Cela apporterait un gain de temps tout en diminuant la quantité de main d'œuvre nécessaire et le niveau de difficulté du travail pour cette dernière. Une augmentation de la qualité serait donc probablement observée. Toutefois, cette amélioration peut nécessiter, selon les spécifications de la machine, d'augmenter le niveau de pré-assemblage des ouvertures (portes et fenêtres) ou d'ajouter un poste de préparation des entremises.

3.4.2 Mise en place

Une modification du processus de production n'est pas anodine. Il y a bien souvent un investissement à réaliser et une complexité de mise en œuvre. Cette complexité peut venir de différents points, de la main d'œuvre, de l'aménagement actuel, des habitudes plus ou moins ancrées, etc., mais aussi tout simplement de l'ampleur de la modification en tant que telle. Le tableau ci-après présente, pour chaque amélioration, l'investissement et la complexité de mise en œuvre attendus. Il est toutefois important de rappeler que chaque modification nécessite de former le personnel impliqué. Cela représente un investissement supplémentaire à considérer.

Tableau 14 - Évaluation de l'investissement et de la complexité de chaque amélioration

Amélioration	Investissement	Complexité
Famille de produits	0	Très faible
Écrans de guidage	+ (Écrans)	Faible
Table de pré-assemblage	+ (Table)	Faible
Poste de préparation des entremises	+ (Établis ou table)	Faible
Guides lasers	++ (Viseurs lasers & logiciel)	Moyenne
Automate d'assemblage	+++ (Automate d'assemblage & logiciel)	Haute

4 Modèle de simulation

Les propositions d'améliorations présentées précédemment ne sont que des suggestions. Avant d'essayer de les implanter dans un atelier réel, il faut mener une étude plus approfondie des impacts qu'elles peuvent avoir afin de tirer des conclusions quant à leur valeur potentielle. Il n'est bien sûr pas question d'implanter toutes ces modifications dans un atelier réel afin d'en connaître l'effet. La simulation va donc être utilisée ici pour évaluer l'impact que peuvent avoir ces modifications sur l'efficacité de l'atelier de production étudié.

4.1 Implémentation dans le logiciel de simulation – hypothèses de simplification

Un modèle de simulation reflétant un processus réel de production, sa création présente différentes difficultés à surmonter.

Tout d'abord, il est nécessaire d'avoir des données en quantité suffisante et pertinentes puisque, plus les données sont justes et nombreuses, meilleur pourra être le modèle. Pour notre cas d'études, les données recueillies correspondent à l'historique de production du 1^{er} novembre 2016 au 31 octobre 2017, à la table des temps standards établie par l'entreprise et à la modélisation du processus de production faite précédemment (cf. section 3.2).

Une fois les données recueillies, il faut choisir le niveau de détail à donner à la simulation. Il s'agit de modéliser ce qui est nécessaire afin de répondre à un besoin précis. Ainsi, seul le processus présenté sur la Figure 3 fut implémenté et le niveau de détail choisi est celui d'un panneau de mur et de certains composants principaux qu'il est utile de distinguer, à savoir les lisses, le revêtement, les pré-assemblage et dans certains cas les entremises.

Par la suite, lorsque nécessaire, des hypothèses de simplification peuvent être posées. En l'occurrence, le processus en question présente de fortes variabilités et incertitudes qu'il faut modéliser via des méthodes mathématiques. Représenter cette complexité peut être parfois trop complexe, demander un effort trop important par rapport aux moyens déployés. Il est donc nécessaire de faire des hypothèses afin de simplifier le processus, le rendre plus facile à implémenter, tout en déviant le moins possible de la réalité. Dans la suite de cette section sont exposées les différentes hypothèses de simplification qui ont pu être faites.

4.1.1 Caractéristiques des produits

Chaque produit a différentes caractéristiques indiquant ses dimensions et sa nature. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 15 - Tableau descriptif des caractéristiques de panneau de mur

Caractéristique	Signification	Valeurs
Type mur	Définis la composition du panneau (présence de revêtement et/ou isolant)	0 = Structure
		1 = Structure + revêtement
		11 = Isolé
		12 = Isolé + revêtement
Complexité	Facteur rendant compte de la complexité de fabrication	1 = Mur simple
		1.4 = Colombages multiples et mur en quinconce
		1.7 = Mur en pente
Distance c/c	Distance centre à centre = distance entre deux goujons	8; 12; 16 ou 24 pouces
Longueur	Données en pieds, arrondies au pouce	Entre 1' et 42'8"
Hauteur	Données en pieds, arrondies au pouce	Entre 1' et 23'9"

C'est à l'aide de ces caractéristiques que seront notamment calculés les temps de production. Celles-ci ont pu être étudiées via l'historique de production. Elles peuvent varier à chaque panneau produit ou à intervalles plus ou moins réguliers. En effet, l'ensemble des panneaux destinés à un même chantier (appelé *Job*) sont fabriqués les uns à la suite des autres. Au sein d'une job, le type de mur est bien souvent identique et il en va de même pour la hauteur. Par contre, la longueur et la complexité de chaque panneau varient indépendamment des autres panneaux d'une même job. Une première analyse statistique n'a pas permis de dégager de périodicité ou de tendance en dehors du taux d'occurrence de chaque valeur pour chaque caractéristique. Il faudrait réaliser des études statistiques bien plus approfondies qui dépassent le cadre de ce projet pour modéliser avec exactitude ces caractéristiques et leur évolution dans le temps. De plus, il n'y a aucune donnée disponible concernant la distance c/c. Il a donc fallu trouver une distribution en fonction de l'indication suivante donnée par l'entreprise « La moyenne des distances c/c est de 20

pouces ». Ainsi, pour chaque caractéristique, des distributions empiriques discrètes ont pu être extrapolées. Elles sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 16 - Distribution des caractéristiques des panneaux

Variabiles	Valeurs	Proportions
Type mur	0	33.6%
	1	46.1%
	11	6.8%
	12	13.5%
Distance c/c	8	1%
	12	7%
	16	37%
	24	55%
Complexité	1	66.6%
	1.4	31.3%
	1.7	2.1%
Longueur	[1; 42.8]	Taux d'occurrence par valeur (cf. Annexe « Taux d'occurrence Hauteur et Longueur »)
Hauteur	[1; 23.9]	Taux d'occurrence par valeur (cf. Annexe « Taux d'occurrence Hauteur et Longueur »)

4.1.2 Temps d'opération

Afin de définir des temps de production réalistes, il a fallu se référer aux données de temps de production fournies par l'entreprise et aux diagrammes de processus présentés à la Figure 3 et en annexe A.1. En effet, les temps disponibles correspondaient à des tâches de production et non à des postes de production, chaque poste pouvant correspondre à la réalisation de plusieurs tâches de production à la fois. De plus, il est à noter que chaque produit n'est pas nécessairement traité en un temps identique et ne subit pas forcément le même traitement. Il a donc fallu implémenter des temps de production variant en fonction des caractéristiques de chaque produit. Ces temps sont explicités dans un tableau visible en annexe « Temps d'opération pour le processus de production des panneaux de murs ».

4.1.3 Le modèle de simulation

À la suite de ces différentes réflexions, le processus de production était suffisamment bien connu pour être recréé virtuellement à l'aide du logiciel de simulation *Simio*. Le visuel complet est visible en Figure 4. On peut y distinguer les stations correspondant aux étapes de préparation (agrandissement sur la Figure 5), ainsi que les deux lignes de production. On peut aussi y voir les opérateurs ainsi que les différentes entités utilisées dans le modèle.

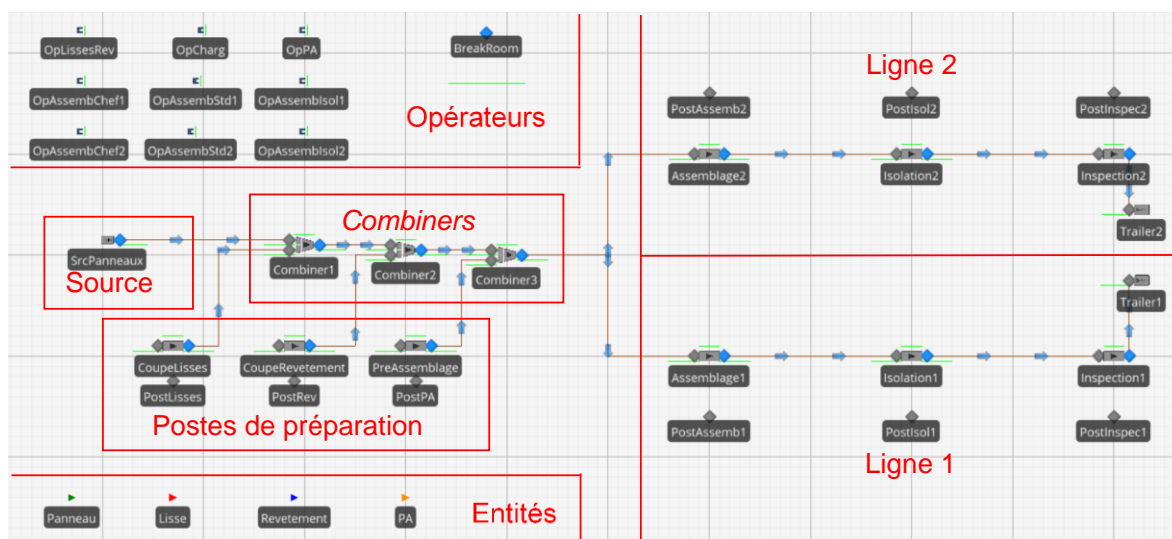


Figure 4 - Visuel du modèle de simulation pour la production des panneaux de murs structuraux chez Structures Ultratec

On peut donc tout d'abord observer une source (SrcPanneaux) qui correspond au point d'entrée des panneaux dans l'atelier. Des entités sont créées selon un processus de Poisson de paramètre 2.43 h^{-1} , c'est-à-dire que le temps inter-arrivée est généré aléatoirement par une loi exponentielle avec une moyenne de $1/2,43 \text{ h}$. Cette valeur est calculée à l'aide de l'historique de production fourni par l'entreprise. Il s'agit tout simplement du nombre de panneaux de murs produits sur une année divisé par le temps de travail correspondant. À ce stade, ce ne sont encore que des lots de bois, mais ils sont représentés par une seule et même entité de type « Panneau ». À chaque création d'une entité de ce type, trois autres entités de type « Lisse », « Revêtement » et « Pré-Assemblage (PA) » sont créées. Chacune de ces trois entités apparaît respectivement aux stations de travail « CoupeLisses », « CoupeRevêtement » et « PréAssemblage ». Ces entités correspondent à des ordres de fabrication. En effet, bien qu'il y ait plusieurs éléments de lisses, de revêtement ou de pré-assemblage, seule une entité de chaque type est produite pour chaque panneau. Après le passage de ces entités dans leurs stations respectives,

c'est-à-dire aux 3 postes de préparation, les entités sont rattachées à l'entité panneau correspondante via des *combiner*. Les trois *combiner* sont des éléments logiques, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de temps correspondant et qu'ils ne sont pas attribués à un opérateur. Chaque *combiner* sert à rattacher deux entités deux à deux, en l'occurrence, une entité panneau avec son entité Lisse, Revêtement ou PA correspondante. De chaque *combiner* ressort une entité de type panneau.

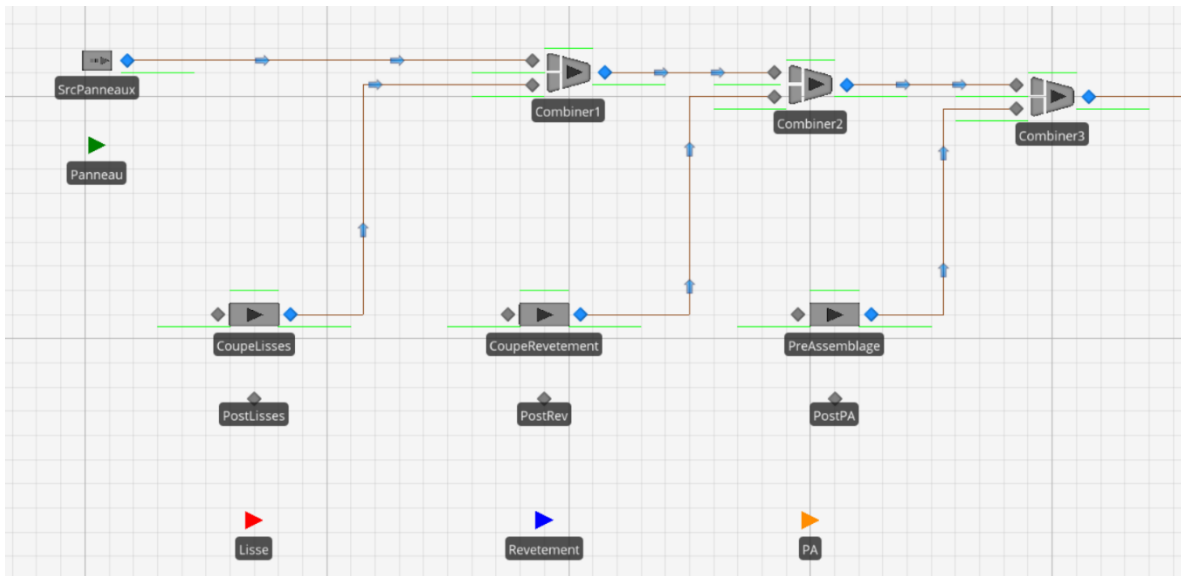


Figure 5 - Agrandissement du modèle de simulation - étapes de préparation

À la sortie du troisième *combiner*, les entités attendent dans la file de sortie que la station « Assemblage 1 » ou « Assemblage 2 » soit libre selon une règle « première entrée, première sortie ». Cela correspond à l'ordonnancement actuel dans les ateliers d'Ultratec, chaque panneau étant traité sur la première table disponible. Une fois qu'une entité est attribuée à un poste d'assemblage, elle reste sur la même ligne de production (1 ou 2). Les deux lignes se comportent de manière identique. Les entités passent alors dans l'ordre au poste d'assemblage, d'isolation, puis d'inspection. Il ne peut y avoir qu'un seul panneau à la fois sur chacune de ces trois stations. Le chemin en aval de l'assemblage peut accueillir un panneau, mais doit être libre pour que le poste d'assemblage puisse être évacué. Les chemins en aval des stations d'isolation et d'inspection doivent être évacués pour qu'une nouvelle entité puisse entrer dans les stations correspondantes. Les « trailers » correspondent à la sortie du modèle de simulation. Il s'agit des remorques sur lesquelles sont empilés les panneaux avant expédition vers le client.

S'agissant d'un modèle de simulation, il est difficile de rendre compte des mouvements exacts des opérateurs. En effet, il faut identifier chaque opérateur individuellement ou par type et définir chacune de leurs tâches respectives. De plus, il faut définir dans le modèle où doit se positionner chaque opérateur lorsqu'il procède à une tâche. Le Tableau 17 présente les différents opérateurs et leurs tâches.

Tableau 17 - Récapitulatif des opérateurs et leurs tâches attribuées

Nom opérateur	Fonction	Tâches
Lisses & Revêtement	Préparation des Lisses Revêtement	Préparation des lisses Préparation des revêtements
Pré-Assemblage	Pré-assemblage	Préparation des éléments préassemblés
Assemblage Standard	Assemblage	Assemblage structure Déplacement (Assemblage -> Isolation)
Assemblage Chef	Assemblage - Chef de table	Inspection (prioritairement) Assemblage structure
Assemblage Isolation	Assemblage & Isolation	Isolation (prioritairement) Assemblage
Chargement	Chargement	Chargement (Inspection -> Trailer) Déplacement (Isolation -> Inspection)

Dans le tableau ci-dessus, on observe que certains opérateurs ont pour tâche le déplacement des panneaux de murs entre deux postes de production. Cependant, aucun déplacement n'est mentionné en amont du poste d'assemblage. En effet, avant assemblage, les déplacements sont beaucoup plus aisés et donc les temps correspondants sont trop insignifiants pour être considérés séparément des tâches auxquelles ils sont reliés. Par exemple, le déplacement des matériaux pour le pré-assemblage du chariot vers l'établi de travail puis des éléments préassemblés de l'établi vers le chariot est imputé à l'opérateur *Pré-assemblage* et les temps correspondants sont comptabilisés directement dans le temps de traitement de la station « Pré-assemblage ».

Il y a dans l'usine des quarts de travail avec des horaires de travail. Chaque poste est cependant censé être occupé en tout temps et les horaires sont identiques pour tous. Par simplicité, aucun horaire de travail n'a donc été implémenté dans le modèle. Afin de faire fonctionner le modèle de simulation sur une période donnée, la durée totale de travail a été calculée et la simulation a été faite sur cette durée. Ainsi, pour une période d'un an, du 1^{er}

novembre 2016 au 31 octobre 2017, le temps de travail effectué est estimé à 3 577,75 heures.

Par ailleurs, les aléas liés au fonctionnement d'une usine, tels que les bris, la maintenance ou l'absence des employés ne sont pas considérés, étant donné l'absence de données fiables à ce sujet. Il s'agit bien entendu d'une approximation puisque de telles problématiques peuvent être majeures et avoir un impact important sur la productivité d'un atelier de fabrication.

4.2 Vérification et Validation du modèle

Ici sont menées la validation du modèle conceptuel (c'est-à-dire du processus de production présenté dans la section 3.2), la vérification de l'implémentation du modèle dans le logiciel *Simio* (modèle informatisé) et la validation opérationnelle du modèle, c'est-à-dire la preuve que le modèle donne des résultats cohérents, c'est-à-dire en accord avec ce qui est observable via le système réel. Le but de ces démarches est tout simplement de s'assurer que le modèle est utilisable et de déterminer dans quelles mesures il l'est.

Comme expliqué dans la section 1.3, de multiples techniques existent, mais ne sont pas toutes applicables, tout dépend du type de modèle développé et de comment il a été développé. Ici les techniques suivantes ont été utilisées :

- Animation : Le logiciel *Simio* permet de développer un modèle animé, ce qui permet de vérifier le comportement des entités ;
- Trace : Il s'agit de la liste de l'ensemble des événements qui se produisent dans l'ordre chronologique lors de la simulation. Le logiciel *Simio* fournit la trace au fur et à mesure que la simulation fonctionne. Ces informations permettent d'examiner en détail le comportement du modèle ;
- Graphiques opérationnels : la transposition de certaines données dans des graphiques peut permettre de mieux visualiser le comportement du modèle. Un éventail de possibilités (diagrammes en secteurs, étiquettes, etc...) est mis à disposition dans le logiciel *Simio* ;
- Validité apparente : L'œil d'un expert peut permettre de conclure sur des modèles simples ;

- Validité interne : La variabilité des données sortant d'un modèle peut permettre de déterminer s'il est viable ou non ;
- Validation par données historiques : La comparaison des résultats d'un modèle avec les données historiques permet de confirmer ou d'infirmer la validité du modèle.

Les lignes suivantes décrivent comment le modèle de simulation a été vérifié et validé.

4.2.1 Validation du modèle conceptuel

Le modèle théorique présenté dans la section 3.2, c'est-à-dire le processus de production des panneaux de murs, a été validé en utilisant la méthode de la validité apparente. En effet, suite à la création du modèle, les diagrammes d'activités ont été présentés à plusieurs experts dont la directrice et le co-directeur de cette maîtrise, Nadia Lehoux et Sylvain Ménard, ainsi que des responsables de *Structures Ultratec*, à savoir le directeur de production, Benoît Delisle, et des membres du conseil d'administration, Maxime et Michel Beaudoin. Ces derniers ont pu, via leur expérience, dire si les diagrammes présentés reflétaient bien la réalité. C'était le cas puisqu'ils ont tous validé ces diagrammes d'activités.

4.2.2 Vérification de l'implémentation

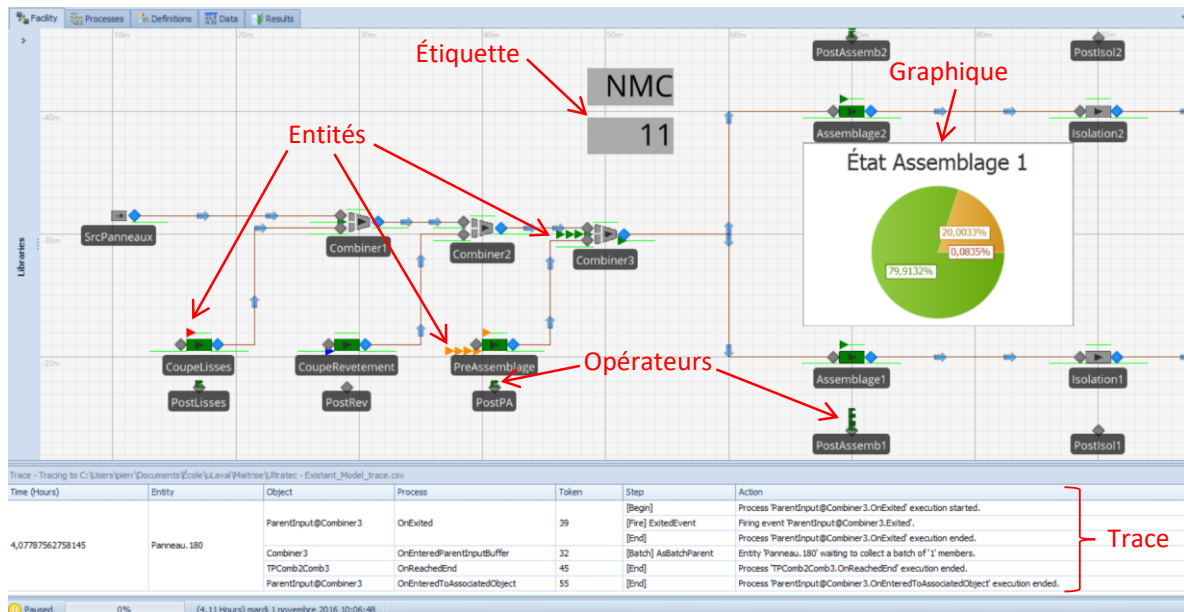


Figure 6 - Visuel de la simulation avec des outils de vérification de l'implémentation

Comme expliqué dans la section 1.3, le développement d'un modèle de simulation est un processus itératif. En effet, chaque élément ou logique implémenté doit être vérifié pour s'assurer que le modèle est fonctionnel. Il y a donc un va-et-vient incessant entre la modélisation et la vérification. Pour notre cas, des graphiques opérationnels, l'animation et la trace du modèle ont été utilisés. Quelques exemples sont montrés dans la Figure 6 ci-dessus. On peut y observer les entités et opérateurs qui sont animés au fur et à mesure du déroulement de la simulation. Ainsi, il est possible de visualiser si leur comportement dans le système est normal. Des étiquettes et graphiques sont aussi disponibles pour permettre de visualiser l'évolution en temps réel de l'état de certaines variables d'importance. Enfin, en bas de la figure est visible la trace qui est écrite au fur et à mesure de la simulation. Cela permet de lire le comportement exact de certaines entités ou de certains opérateurs et les processus fonctionnant en arrière-plan en cas de problème. La combinaison de ces outils utilisés adéquatement et adaptables à chaque besoin permet de mener des vérifications et, le cas échéant, de résoudre les problèmes qui peuvent apparaître tout au long du développement.

4.2.3 Validation opérationnelle

Il s'agit de la partie la plus importante. Lorsque le modèle est fonctionnel, il faut s'assurer qu'il a la précision suffisante pour l'utilisation prévue (Sargent, 2013). Pour cette étape, ce sont la validité interne et la validation par données historiques qui furent utilisées. En effet, le logiciel de simulation utilisé permettait de faire plusieurs itérations pour un même scénario dans des temps très raisonnables. L'historique de production fourni par la compagnie fut donc utilisé pour extraire des données et les comparer avec les résultats de la simulation.

Il est important de bien choisir les paramètres de décision. En effet, il faut que ces paramètres et leur interprétation soient significatifs pour valider le modèle et évaluer sa précision. Ainsi les paramètres présentés ci-dessous furent ceux retenus :

- La quantité produite : Il s'agit du premier critère de décision. En effet, le but est d'étudier la possibilité d'augmenter le niveau de production de l'atelier, donc de la quantité produite. Il s'agit donc de valider que le modèle est en mesure de fournir une valeur cohérente pour la quantité produite ;

- Le nombre moyen de chariots (NMC) : Lorsque les panneaux de murs arrivent dans l'atelier, à l'état de lots de morceaux de bois, chaque lot est stocké sur des chariots jusqu'à assemblage de la structure. Le nombre de chariots correspond donc à la quantité d'encours entre la source du processus et le début de l'entrée des postes de production *Assemblage1* ou *Assemblage2*. Dans la suite du processus, le nombre d'encours est borné, notamment par la capacité des postes de production et des chemins que peuvent prendre les produits. Il est donc beaucoup moins intéressant, voire inutile, de prendre en compte ces encours. Ainsi l'indicateur *Nombre Moyen de chariots* permettra d'évaluer s'il y a une augmentation significative des stocks d'encours.
- Les distributions de chaque caractéristique (cf. section 4.1.1) : La distribution empirique des niveaux de chaque caractéristique, c'est-à-dire de l'ensemble des valeurs prises par chaque caractéristique, est évaluée via l'historique de production. Le type de mur, la complexité et la distance c/c sont des caractéristiques discrètes, qui ne peuvent prendre que certaines valeurs définies. La longueur et la hauteur sont des variables continues, il a donc fallu définir des intervalles de valeurs. Ces intervalles ont été choisis à l'aide des temps standards. En effet, ces derniers dépendent parfois des dimensions des panneaux de murs. Il a donc fallu déterminer des intervalles qui correspondent. Ainsi, en validant que ces intervalles sont respectés, on peut s'assurer indirectement que les temps standards seront cohérents.
- Le temps de traitement moyen à chaque station de travail : N'ayant que peu d'information exacte à ce sujet, ces paramètres servent surtout à mesurer la variabilité du modèle.

Le nombre de réplifications est un élément à choisir avec sérieux. Pour avoir des résultats suffisamment cohérents, avec un intervalle de confiance de taille raisonnable, il est en effet important de répliquer chaque scénario de chaque expérience en un nombre cohérent de fois. En accord avec (Ruiz & Gagliardi, 2017), 30 réplifications est en général une quantité raisonnable par rapport au temps de calcul investi. Un total de 30 réplifications seront donc faites pour chacun des scénarios présentés dans la suite de ce document.

Le Tableau 18 ci-dessous présente les différents paramètres de décision ainsi que les valeurs obtenues via la simulation tout en précisant les valeurs réelles correspondantes.

Les valeurs simulées sont, pour chaque paramètre, la moyenne des 30 répliques accompagnée de leur demi-intervalle de confiance ($\frac{1}{2}$ IC) à 5%. Aucune exigence n'ayant été formulée à ce sujet, c'est la valeur de 5% qui a été retenue pour le niveau de confiance. Les valeurs réelles sont celles observées à l'aide des informations données par l'entreprise, c'est-à-dire des données historiques. Les intervalles utilisés pour les hauteurs et longueurs de panneaux sont définis en fonction des temps standards. En effet, les temps standards sont en grande partie dépendants de ces dimensions. Il est donc important que la simulation rende bien compte de cette distribution précise pour être le plus fidèle possible à la réalité. La valeur du nombre moyen de chariots est une information non disponible. Cependant, selon les dires des opérateurs, le nombre moyen de chariots serait en moyenne de 7. Il s'agit d'une information informelle sur laquelle aucune conclusion ne peut toutefois être fondée.

Le Tableau 18 permet donc de conclure quant à la validation du modèle de simulation. Le premier critère de validation est que la valeur réelle d'un paramètre doit être comprise dans l'IC. Lorsque ce critère est validé, alors la valeur réelle est colorée en vert. On observe ainsi que tous les paramètres hormis un, la complexité de 1.7, satisfont ce critère. Cependant, il est à noter que l'écart de ce dernier est très faible (0.01% en dehors de l'IC) et que les deux autres expressions de la caractéristique complexité satisfont le critère de validité. On peut donc conclure que dans l'ensemble, le modèle de simulation donne des résultats similaires à l'historique de l'entreprise.

Le second critère de validation est la variabilité des valeurs simulées. Cela peut être évalué en observant les IC de chaque paramètre. Chaque IC s'avère être tout à fait raisonnable puisque la taille du $\frac{1}{2}$ IC est inférieure ou égale à 5% dans tous les cas. On peut donc conclure que la validité interne du modèle est validée.

Les deux critères exposés ci-dessus étant validés, le modèle peut être accepté comme valide et utilisé pour mener les expériences exposées dans la section suivante.

Tableau 18 - Récapitulatif des paramètres de décision utilisés pour la validation opérationnelle du modèle de base

Nombre Réplifications	30	Simulé		Réel
		Paramètre	Moyenne		½ IC
	Quantité produite (u.)	8700	35.50	8697
	Nombre moyen de chariots (u.)	5.74	0.42	7
Temps de production moyen (min.)	Assemblage	74.48	0.32	N/A
	Isolation	4.26	0.04	N/A
	Inspection	4.83	0.02	N/A
	Lisses	4.43	0.01	N/A
	Revêtement	6.37	0.03	N/A
	Pré-Assemblage	16.61	0.00	N/A
Distance c/c	8	1.00%	0.05%	1.00%
	12	6.93%	0.09%	7.00%
	16	36.98%	0.19%	37.00%
	24	55.09%	0.20%	55.00%
Hauteur	[1; 4.33]	1.64%	0.06%	1.68%
	]4.33; 8.33]	11.86%	0.14%	11.91%
	]8.33; 12.5]	82.52%	0.17%	82.47%
	]12.5; 16.5]	2.37%	0.06%	2.35%
	]16.5; 23.75]	1.60%	0.04%	1.60%
Longueur	[1; 3.67]	16.21%	0.12%	16.19%
	]3.67; 6.5]	14.35%	0.15%	14.26%
	]6.5; 9.33]	20.66%	0.16%	20.65%
	]9.33; 12.08]	26.83%	0.18%	26.98%
	]12.08; 20.42]	11.27%	0.11%	11.32%
	]20.42; 42.75]	10.68%	0.16%	10.60%
Type Mur	0	33.71%	0.17%	33.62%
	1	46.07%	0.19%	46.10%
	11	6.74%	0.11%	6.80%
	12	13.48%	0.15%	13.49%
Complexité	1	66.53%	0.12%	66.57%
	1.4	31.39%	0.14%	31.29%
	1.7	2.08%	0.05%	2.14%

4.3 Expérimentations

Le modèle principal étant validé, il s'agit à présent d'implémenter les améliorations présentées dans la section 3.4 pour en mesurer les effets sur l'efficacité du système de production à l'étude. Ce sera fait en créant des modèles dérivés, appelés scénarios, du modèle principal. Pour certaines modifications, il a fallu contacter des équipementiers afin d'obtenir des informations. Relativement peu d'équipementiers ont toutefois répondu et encore moins ont donné des informations concernant l'amélioration des temps de production que leur équipement pouvait apporter. Ils se sont surtout limités à donner de la documentation technique contenant les spécifications des équipements tels que leurs dimensions et les installations nécessaires. Les prochaines lignes décrivent comment chaque piste d'amélioration a été implantée dans le modèle.

Famille de produits : Cette amélioration est simple à mettre en place, il suffit d'insérer une règle de routage à la sortie du *Combiner 3*. En effet, avec ajout d'une telle règle, on peut envoyer les entités de type 0 ou 1, c'est à dire des panneaux de murs creux qui n'ont pas besoin d'isolation, vers la ligne de montage numéro 2. Toutes les autres entités sont alors libres d'aller vers la ligne 1 ou 2 en fonction de la disponibilité des stations *Assemblage1* ou *Assemblage2*.

Guides lasers : Cette amélioration consiste en l'ajout d'équipement aidant à la production au niveau des stations *Assemblage1* ou *Assemblage2*, mais il n'y a aucune modification de l'aménagement ou des tâches. Il suffit donc de modifier le temps d'assemblage de la structure. Aucune compagnie d'équipement n'a malheureusement pu fournir de valeur précise à ce sujet. Le seul chiffre disponible est fourni par le co-directeur de ce travail de maîtrise, Sylvain Ménard, qui a plusieurs années d'expérience dans le milieu. Selon ses dires, une diminution de 30% du temps de traitement peut être espérée.

Écrans de guidage : Aucune information n'a pu être trouvée à ce sujet. Cette amélioration restera donc à l'état de proposition et ne sera pas implémentée dans le modèle de simulation.

Table de pré-assemblage : Ici il s'agit de transférer une partie du travail de l'assemblage de la structure vers le pré-assemblage. Ce sont deux postes de production qui existent déjà. Il suffit donc de modifier les temps de traitement correspondant dans le modèle de

simulation. Cette fois encore, aucune information concrète n'a été trouvée. Cependant Sylvain Ménard a conseillé, en se fiant à son expérience, de transférer 20% du temps d'assemblage de la structure vers le temps de pré-assemblage.

Poste de préparation des entremises : Il s'agit ici de transférer une tâche précise du processus d'assemblage de la structure vers un nouveau poste. Un nouveau poste de préparation, semblable à celui de la préparation des lisses, du revêtement ou du pré-assemblage, a donc été ajouté. Ce poste a pu être ajouté en aval des postes de préparation et en amont de l'assemblage (cf. Figure 7). Il a fallu y attribuer un opérateur et un temps de traitement. Suite à la validation et à l'étude du modèle simulant l'existant (cf. section 5.1.1), l'opérateur le moins occupé a été choisi. Il s'agit de l'opérateur chargé de la préparation des lisses et du revêtement. Quant au temps de traitement, des informations précises sont données dans la fiche des temps standards fournie par l'entreprise. Ce temps standard est variable en fonction des caractéristiques de chaque panneau (cf. Section 4.1.2). Ce temps a aussi dû être soustrait au temps d'assemblage.

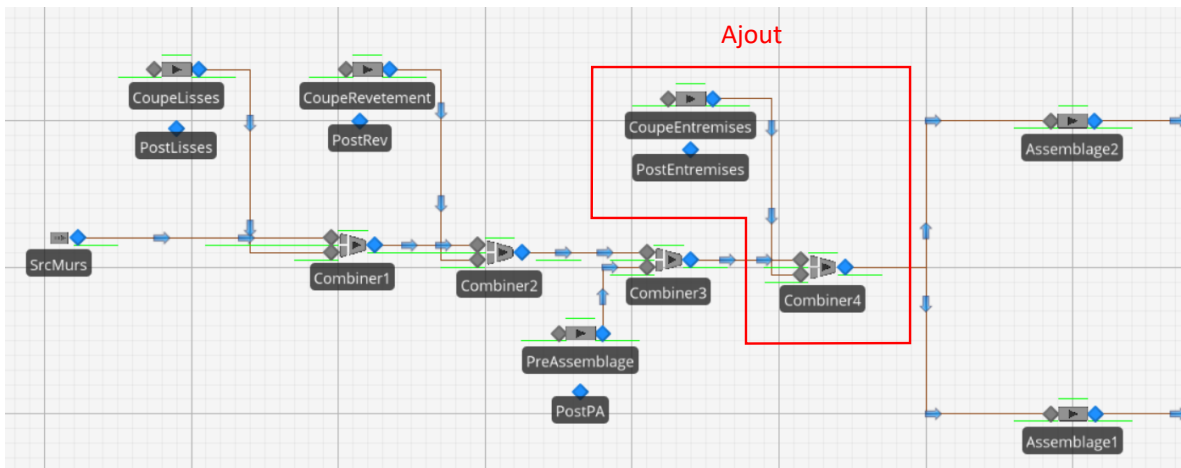


Figure 7 - Visuel du modèle de simulation après ajout du poste de préparation des entremises

Automate d'assemblage : Cette amélioration consiste en l'achat d'un équipement automatisé pour le poste d'assemblage de la structure. Des informations ont pu être trouvées pour cette modification. La compagnie *Square1Design*, possédant la marque *Spida*, propose un équipement nommé *Wall Extruder System*. Cet équipement demande un certain niveau de pré-assemblage en amont. Ainsi, il est nécessaire de faire la préparation des entremises en amont. Le modèle modifié pour l'amélioration *Préparation des entremises* servira donc de base. Selon les spécifications, seul un opérateur est nécessaire. Dans le processus de base, plusieurs opérateurs sont requis au poste d'assemblage. Pour tenir

compte de cette amélioration, il s'agit donc de veiller à affecter les opérateurs *Assemblage chef* et *Assemblage Isolation* uniquement aux postes d'inspection et d'isolation. Il peut être prévu que ces quatre opérateurs auront dès lors un taux d'occupation plus faible. Ce seront donc eux qui seront en charge de la préparation des entremises, sur la base du premier disponible et dans l'ordre suivant : *Opérateur Assemblage Isolation 1*, *Opérateur Assemblage Isolation 2*, *Opérateur Assemblage Chef 1*, *Assemblage Chef 2*. Le temps de préparation des entremises est calculé en fonction des caractéristiques de chaque panneau. Selon un représentant de *Square1Design*, ce type d'équipement peut fournir une production moyenne de 600 à 900 pieds linéaires de panneaux par jour, pour une usine fonctionnant avec 2 quarts de production (jour et soir), c'est-à-dire une moyenne de 750 pieds linéaires. En se basant sur l'historique de production de *Structures Ultratec*, la production actuelle est en moyenne de 356 pieds linéaires par jour sur un même schéma horaire. En émettant l'hypothèse que la production de l'atelier est aujourd'hui limitée par la capacité de ce poste de production, hypothèse confirmée par la suite (cf. section 5.1.1), le recours à un Automate d'assemblage pourrait donc représenter une augmentation de la production de $750/356 = 211\%$. Le temps d'assemblage serait alors divisé par 2,11. Toutes les spécifications de l'automate correspondent aux caractéristiques de la production actuelle, hormis la longueur des panneaux. En effet, Le *Spida Wall Extruder System* ne peut produire de panneau de mur de plus de 20 pieds. Hors environ 11% des panneaux produits actuellement ont une longueur de plus de 20 pieds, ils devront donc être assemblés en plusieurs panneaux de murs puis assemblés en un seul panneau par la suite. Pour éviter toute difficulté d'implémentation, le temps nécessaire pour assembler plusieurs panneaux de murs de moins de 20 pieds en un panneau de murs de plus de 20 pieds sera négligé. Ainsi, tous les panneaux de murs sont traités de la même manière dans le modèle de simulation, peu importe la longueur.

Pour déterminer quelle amélioration permettrait le meilleur gain en efficacité, il devient pertinent d'étudier la réaction de tels scénarios face à une augmentation de la demande. Cette augmentation de la demande se traduit par une augmentation du taux d'arrivée. C'est donc différents niveaux de cette variable qui seront soumis à chaque scénario. D'abord, tous les scénarios seront soumis au taux d'arrivée actuel (calculé via l'historique de production). Ensuite, le taux d'arrivée sera augmenté par pas de 5% jusque 15%. Finalement, si les résultats semblent intéressants, alors des scénarios jusque 40% d'augmentation du taux d'arrivée seront simulés.

L'ensemble des mesures d'implémentation des améliorations suggérées et à investiguer à l'aide la simulation est récapitulé ci-dessous dans le Tableau 19.

Tableau 19 - Récapitulatif des méthodes d'implémentation des améliorations suggérées

Amélioration	Scénario à investiguer
Famille de produits	Routage des entités selon le type de mur
Guides lasers	Ajustement du temps d'assemblage de la structure : -30% du temps actuel
Écrans de guidage	Aucune implémentation
Table de pré-assemblage	Report d'une partie du temps de traitement de l'assemblage de la structure (20%) vers le temps de traitement du pré-assemblage
Poste de préparation des entremises	Ajout d'un nouveau poste de préparation Temps de préparation des entremises retiré de l'assemblage de la structure Temps variable selon les caractéristiques des panneaux Utilisation de l'opérateur responsable de la préparation des lisses et du revêtement
Automate d'assemblage	Basé sur la modification du poste de préparation des entremises Utilisation d'un seul opérateur pour l'assemblage de la structure (<i>Assemblage Standard</i>) Utilisation des opérateurs <i>Assemblage Isolation</i> et <i>Assemblage Inspection</i> pour la préparation des entremises Modification du temps d'assemblage de la structure: temps existant /2,11

4.4 Les indicateurs de performances

Afin d'évaluer les propositions d'amélioration et de conclure sur la valeur qu'elles apportent à l'entreprise, des indicateurs de performance clés furent identifiés et calculés. Pour chacun, c'est la moyenne des valeurs obtenues par chaque réplication couplée à son demi-intervalle de confiance qui est considéré. Ces indicateurs sont les suivants :

- Quantité produite : Il s'agit de l'ensemble des panneaux de murs qui ont pu être produits dans le laps de temps de la simulation, à savoir l'équivalent d'une année. Cet indicateur correspond à l'objectif principal puisque le but de cette étude est d'identifier les améliorations pouvant amener l'entreprise à gagner en efficacité, soit produire plus qu'actuellement en un temps donné.
- Nombre moyen de chariots (NMC) : C'est la moyenne du nombre de chariots tout au long de la simulation. Comme expliqué dans la section 4.2.3, les chariots représentent les encours entre la source et l'entrée dans l'un des deux postes de

production *Assemblage1* ou *Assemblage2*. Pour des questions pratiques, ils ne sont pas représentés directement dans la simulation. Le NMC permet de dire si une solution est réaliste ou non. En effet, un scénario qui amènerait une forte augmentation de la quantité produite ne peut être pris au sérieux si le nombre d'encours dans l'atelier est trop élevé. À l'heure actuelle, il y a 9 chariots disponibles dans l'atelier. Si la simulation montre qu'il peut être intéressant d'augmenter ce nombre afin de gagner en efficacité, alors il est envisageable de trouver l'espace nécessaire pour que ce chiffre double. Pour l'analyse des résultats, un NMC ne dépassant pas 18 est donc considéré comme réaliste.

- Taux d'occupation : Pour chaque opérateur et poste de production, il s'agit du temps occupé divisé par le temps total. Cela permet entre autres de surveiller l'effet de chaque amélioration sur la charge de travail de chaque opérateur ou poste de production. Bien qu'intimement liés, les deux types de taux d'occupation sont présentés, car il peut y avoir des disparités. Cela s'explique par le fait que les opérateurs peuvent avoir plusieurs tâches ou alors par le fait que certains postes peuvent être bloqués si les postes de production en aval du flux de production sont occupés. Cet indicateur permet ainsi d'approfondir l'analyse de chaque scénario et d'expliquer certains résultats observés via les indicateurs précédents. Cependant, n'ayant pas suffisamment d'information à ce sujet, il est préférable de ne pas définir de cible précise. À ceci près qu'il est préférable d'observer des taux d'occupation élevés, mais qui n'atteignent toutefois pas 100%. En effet, le facteur humain induit qu'il n'est pas réaliste qu'un opérateur soit occupé 100% de son temps.

Pour chaque amélioration, de tels indicateurs permettront de comparer les différents scénarios entre eux puis de valider si une amélioration est viable ou non.

5 Résultats et discussion

Dans ce chapitre, les résultats obtenus après implémentation des améliorations potentielles dans la simulation sont présentés.

Pour mener à bien les expérimentations, il fut nécessaire d'étudier le scénario de départ reflétant les installations et façons de faire actuelles de l'entreprise à des fins de comparaison. En effet, une telle analyse a l'avantage de permettre de mieux visualiser comment se comporterait le système existant face à une augmentation du taux d'arrivée et donc de conclure sur l'efficacité de chaque amélioration. Pour chaque amélioration considérée, il fut nécessaire de soumettre à la simulation les scénarios dont il est question à la fin de la section 4.3. Afin d'avoir un point de comparaison, le scénario *Existant* a de plus dû être simulé suivant les mêmes taux d'augmentation des arrivées que ceux utilisés pour les autres scénarios. Tout d'abord, une analyse de la réaction de chaque scénario face à l'augmentation du taux d'arrivée est proposée. Suite à avoir traité séparément chaque scénario, une comparaison de ces améliorations potentielles sera menée.

5.1 Résultats par scénario

5.1.1 Existant

Les tableaux et figures ci-dessous présentent les résultats du scénario de base lorsqu'on augmente le taux d'arrivée. À l'aide du Tableau 20 et de la Figure 8, on peut observer dans un premier temps une augmentation significative de la quantité produite jusqu'au scénario *Taux + 20%*. À partir de cette valeur critique, on observe que la quantité produite a stagné, ce qui implique une saturation du système. En effet, la quantité d'entités (i.e. de panneaux) entrant dans le système doit être trop grande par rapport la quantité d'entités que le système peut traiter. Il a donc atteint sa capacité maximale. On observe par ailleurs une très forte augmentation du nombre moyen de chariots, ce qui traduit une situation irréaliste puisque le NMC dépasse largement le nombre maximum attendu de 18. En effet, il n'est tout simplement pas possible d'avoir plusieurs dizaines, voire centaines, de chariots en attente. Cela représente un coût et un espace qui ne sont pas disponibles.

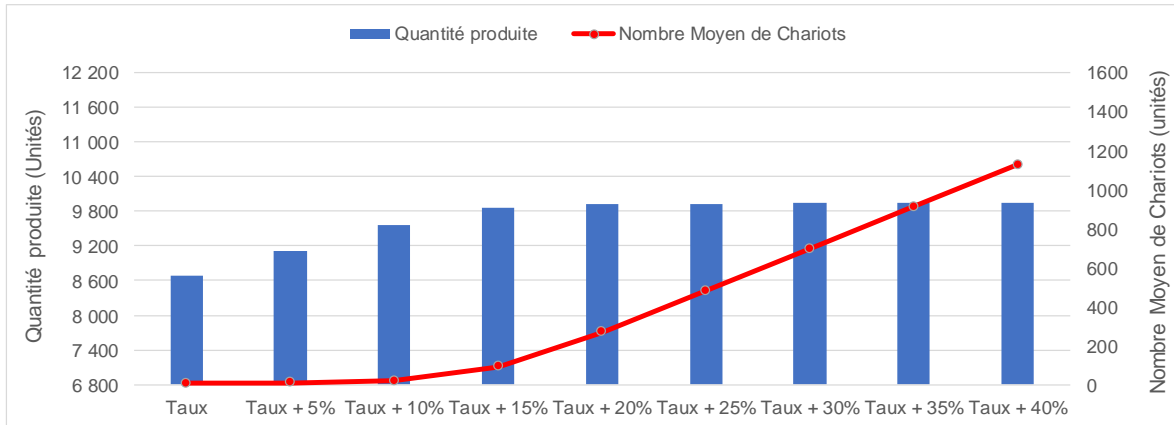


Figure 8 - Résultats pour le scénario "Existant" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)

Tableau 20 - Résultats pour le scénario "Existant" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%	Taux + 20%	Taux + 25%	Taux + 30%	Taux + 35%	Taux + 40%
Quantité produite (u.)	Moyenne	8690	9110	9554	9861	9928	9934	9937	9938	9938
	½ IC	30	36	40	30	34	34	34	34	35
NMC (u.)	Moyenne	5.7	9.4	19.8	91.5	267.5	479.5	694.8	911.7	1128.5
	½ IC	0.3	0.9	3.6	20.1	29.4	31.1	31.9	32.4	32.8

Les tableaux 21 et 22 de même que les figures 9 et 10 ci-dessous permettent d'étudier le taux d'occupation des opérateurs et des postes de production pour de tels taux d'arrivée. Il est ainsi possible de déterminer quel(s) opérateur(s) ou poste(s) peuvent être des goulots pour le processus de production des panneaux de murs. On observe ici que, comme cela a été présupposé, ce sont bien les postes de production Assemblage 1 et Assemblage 2 qui sont les plus chargés et qui limitent la capacité de production de l'atelier. On peut également observer que le poste de pré-assemblage et son opérateur attiré ont un taux d'occupation relativement élevé. On peut donc déduire qu'une fois les postes de production goulots, Assemblage 1 et Assemblage 2, traités, ce sera fort probablement le poste de pré-assemblage qui deviendra un nouveau goulot. Il sera donc nécessaire de surveiller les taux d'occupation correspondants au pré-assemblage.

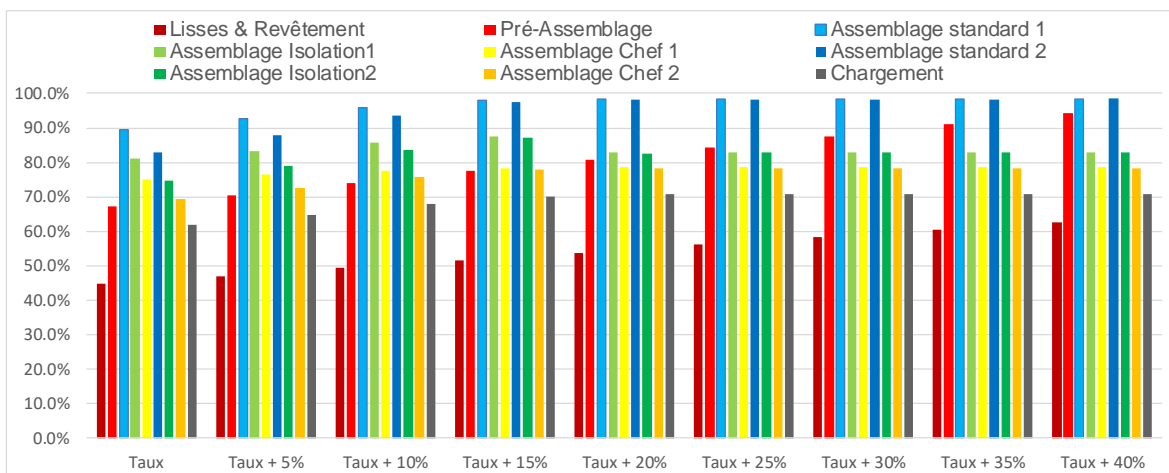


Figure 9 - Résultats pour le scénario "Existant" - Taux d'occupation des opérateurs

Tableau 21 - Résultats pour le scénario "Existant"- Taux d'occupation des opérateurs

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%	Taux + 20%	Taux + 25%	Taux + 30%	Taux + 35%	Taux + 40%
Lisses & Revêtement	Moyenne	44.8%	47.0%	49.2%	51.5%	53.7%	56.0%	58.2%	60.5%	62.7%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
Pré-Assemblage	Moyenne	67.3%	70.6%	74.1%	77.5%	80.9%	84.3%	87.6%	91.0%	94.3%
	½ IC	0.2%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
Assemblage standard 1	Moyenne	89.6%	92.6%	95.8%	98.0%	98.4%	98.4%	98.5%	98.5%	98.5%
	½ IC	0.2%	0.3%	0.4%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Assemblage Isolation1	Moyenne	81.1%	83.4%	85.8%	87.5%	82.9%	82.9%	82.9%	82.9%	82.9%
	½ IC	0.2%	0.3%	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
Assemblage Chef 1	Moyenne	75.1%	76.4%	77.5%	78.3%	78.6%	78.6%	78.6%	78.6%	78.6%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
Assemblage standard 2	Moyenne	82.8%	88.0%	93.5%	97.6%	98.3%	98.3%	98.4%	98.4%	98.4%
	½ IC	0.4%	0.6%	0.7%	0.3%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Assemblage Isolation2	Moyenne	74.8%	79.1%	83.7%	87.1%	82.7%	82.8%	82.8%	82.8%	82.8%
	½ IC	0.4%	0.5%	0.6%	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
Assemblage Chef 2	Moyenne	69.4%	72.5%	75.8%	78.0%	78.3%	78.3%	78.3%	78.3%	78.3%
	½ IC	0.3%	0.4%	0.4%	0.3%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Chargement	Moyenne	61.8%	64.8%	68.0%	70.2%	70.8%	70.9%	70.9%	70.9%	70.9%
	½ IC	0.2%	0.3%	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%

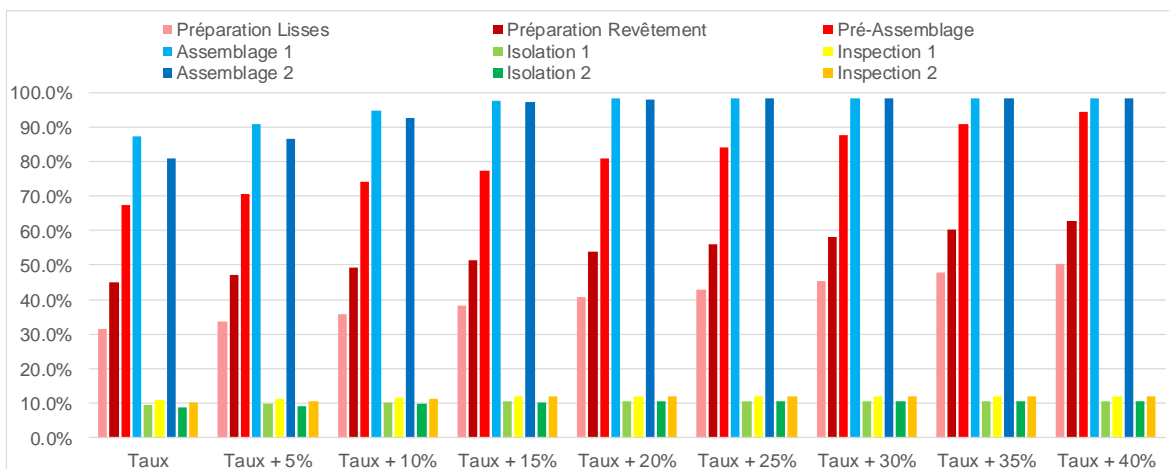


Figure 10 - Résultats pour le scénario "Existant" - Taux d'occupation des postes de production

Tableau 22 - Résultats pour le scénario "Existant"- Taux d'occupation des postes de production

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%	Taux + 20%	Taux + 25%	Taux + 30%	Taux + 35%	Taux + 40%
Préparation Lisses	Moyenne	31.5%	33.6%	35.9%	38.3%	40.6%	43.0%	45.5%	48.0%	50.5%
	½ IC	0.2%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
Préparation Revêtement	Moyenne	44.8%	47.0%	49.2%	51.5%	53.7%	56.0%	58.2%	60.5%	62.7%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
Pré-Assemblage	Moyenne	67.3%	70.6%	74.1%	77.5%	80.9%	84.3%	87.6%	91.0%	94.3%
	½ IC	0.2%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
Assemblage 1	Moyenne	87.3%	90.9%	94.9%	97.7%	98.3%	98.3%	98.3%	98.3%	98.4%
	½ IC	0.3%	0.4%	0.5%	0.3%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Isolation 1	Moyenne	9.5%	9.9%	10.2%	10.4%	10.3%	10.4%	10.4%	10.4%	10.4%
	½ IC	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Inspection 1	Moyenne	10.9%	11.3%	11.6%	11.9%	12.0%	12.0%	12.0%	12.0%	12.0%
	½ IC	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Assemblage 2	Moyenne	81.0%	86.7%	92.7%	97.3%	98.1%	98.2%	98.2%	98.3%	98.3%
	½ IC	0.4%	0.6%	0.7%	0.4%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Isolation 2	Moyenne	8.7%	9.1%	9.9%	10.3%	10.4%	10.4%	10.4%	10.4%	10.4%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%
Inspection 2	Moyenne	10.0%	10.6%	11.3%	11.8%	12.0%	12.0%	12.0%	12.0%	12.1%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%

5.1.2 Familles de produits

Ce scénario consiste en un réordonnement de la production. En utilisant une règle de routage, les panneaux de murs sont attribués à une ligne de production ou l'autre selon le niveau de leur caractéristique Type Mur.

La Figure 11 et le Tableau 23 ci-dessous permettent d'observer l'évolution des quantités produites et du nombre moyen de chariots pour chaque taux d'arrivée. On observe une augmentation significative des quantités produites. Le nombre moyen de chariots augmente

toutefois fortement et montre donc une situation inenvisageable dès que le taux d'arrivée atteint Taux + 10% avec un NMC supérieur à 18. Il devient alors inutile de simuler des taux d'arrivée au-delà de cette valeur puisqu'ils s'avéreront irréalistes.

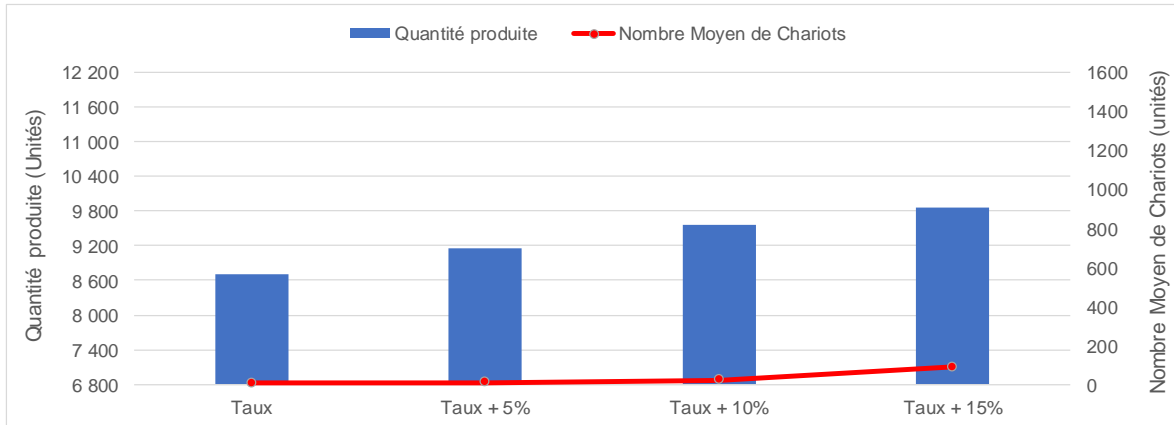


Figure 11 - Résultats pour le scénario "Familles de produits" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)

Tableau 23 - Résultats pour le scénario "Familles de produits" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%
Quantité produite (u.)	Moyenne	8704	9145	9557	9867
	½ IC	38	24	30	30
NMC (u.)	Moyenne	5.9	9.4	20.4	86.9
	½ IC	0.4	0.6	4.8	17.3

Les figures 12 et 13 et les tableaux 24 et 25 ci-dessous montrent les taux d'occupation des opérateurs puis des postes de production. Ce sont les postes de production d'assemblage et les opérateurs *Assemblage standard* qui sont les plus occupés. Ils sont proches d'être saturés (taux d'occupation proche de 100%) pour le scénario *Taux + 15%* ce qui signifie que l'atelier atteint sa capacité de production maximale. Il ne serait donc pas envisageable d'augmenter plus le niveau de production avec cette modification.

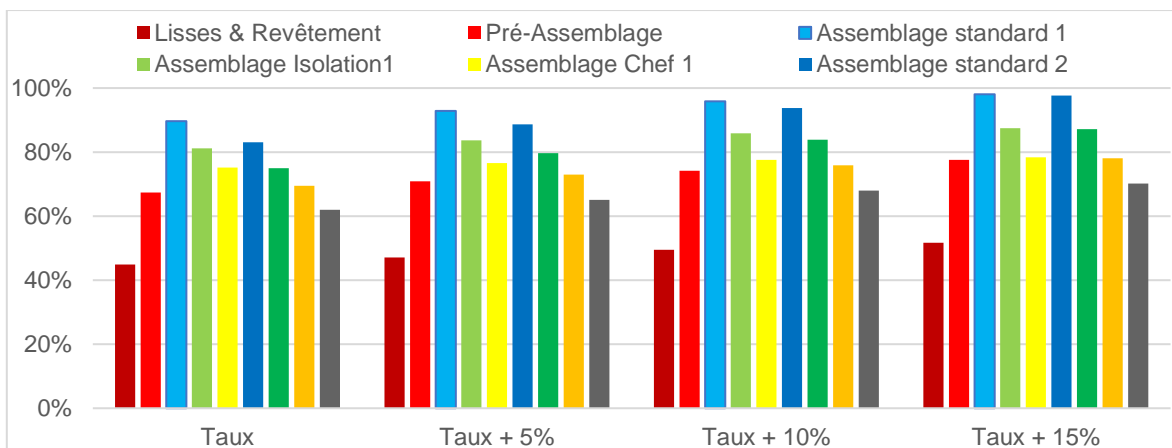


Figure 12 - Résultats pour le scénario "Familles de produits" - Taux d'occupation des opérateurs

Tableau 24 - Résultats pour le scénario "Familles de produits" - Taux d'occupation des opérateurs

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%
Lisses & Revêtement	Moyenne	44.9%	47.1%	49.5%	51.7%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.2%	0.3%
Pré-Assemblage	Moyenne	67.4%	70.8%	74.2%	77.6%
	½ IC	0.3%	0.2%	0.3%	0.4%
Assemblage standard 1	Moyenne	89.7%	92.9%	95.8%	98.0%
	½ IC	0.4%	0.3%	0.3%	0.2%
Assemblage Isolation1	Moyenne	81.2%	83.6%	85.9%	87.5%
	½ IC	0.3%	0.3%	0.3%	0.2%
Assemblage Chef 1	Moyenne	75.2%	76.5%	77.6%	78.4%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
Assemblage standard 2	Moyenne	83.1%	88.6%	93.7%	97.6%
	½ IC	0.6%	0.5%	0.6%	0.3%
Assemblage Isolation2	Moyenne	75.0%	79.6%	83.9%	87.1%
	½ IC	0.5%	0.5%	0.5%	0.2%
Assemblage Chef 2	Moyenne	69.5%	73.0%	75.9%	78.0%
	½ IC	0.4%	0.4%	0.4%	0.2%
Chargement	Moyenne	61.9%	65.1%	68.0%	70.2%
	½ IC	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%

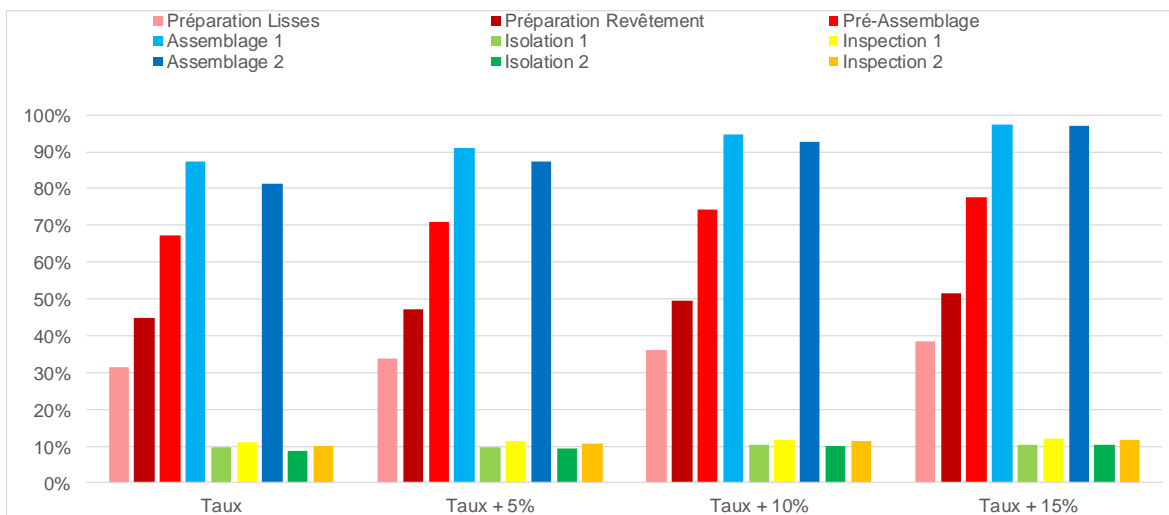


Figure 13 - Résultats pour le scénario "Familles de produits" - Taux d'occupation des postes de production

Tableau 25 - Résultats pour le scénario "Familles de produits" - Taux d'occupation des postes de production

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%
Préparation Lisses	Moyenne	31.6%	33.7%	36.1%	38.4%
	½ IC	0.3%	0.2%	0.3%	0.3%
Préparation Revêtement	Moyenne	44.9%	47.1%	49.5%	51.7%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.2%	0.3%
Pré-Assemblage	Moyenne	67.4%	70.8%	74.2%	77.6%
	½ IC	0.3%	0.2%	0.3%	0.4%
Assemblage 1	Moyenne	87.2%	91.1%	94.6%	97.4%
	½ IC	0.4%	0.4%	0.4%	0.2%
Isolation 1	Moyenne	9.5%	9.8%	10.2%	10.3%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Inspection 1	Moyenne	10.9%	11.3%	11.6%	11.9%
	½ IC	0.1%	0.0%	0.1%	0.0%
Assemblage 2	Moyenne	81.2%	87.2%	92.8%	97.1%
	½ IC	0.6%	0.6%	0.6%	0.3%
Isolation 2	Moyenne	8.7%	9.3%	10.0%	10.4%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%
Inspection 2	Moyenne	10.1%	10.8%	11.4%	11.8%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%

Cette amélioration potentielle ne présente pas de résultats intéressants. Cependant, on ne peut pas conclure de manière définitive que cette amélioration ne peut apporter de la valeur au système puisque les hypothèses posées amènent un biais important. En effet, bien qu'une saisonnalité fût perçue au sein des historiques de production, elle n'a pu être reproduite à l'intérieur de la simulation puisque cela aurait nécessité une étude statistique approfondie dépassant le cadre de ce projet. Cette amélioration a justement été proposée pour exploiter cette caractéristique. Il faudrait donc mieux modéliser la demande au cours

du temps via une étude statistique approfondie et l'implémenter dans le modèle de simulation afin de mieux évaluer l'effet d'une telle modification sur le système de production à l'étude.

5.1.3 Guides lasers

Cette amélioration consiste en l'installation d'un système de guidage par lasers au niveau des postes d'Assemblage. Cela se traduit par une diminution du temps de production correspondant dans la simulation.

Le Tableau 26 et la Figure 14 montrent une augmentation significative de la quantité produite lorsque le taux d'arrivée est augmenté. De plus, le NMC reste raisonnable malgré l'augmentation du niveau de production. Seul le scénario *Taux + 40%* génère un NMC ne respectant pas la limite théorique visée. Cette amélioration paraît donc viable pour une augmentation jusqu'à 35% de la demande actuelle.

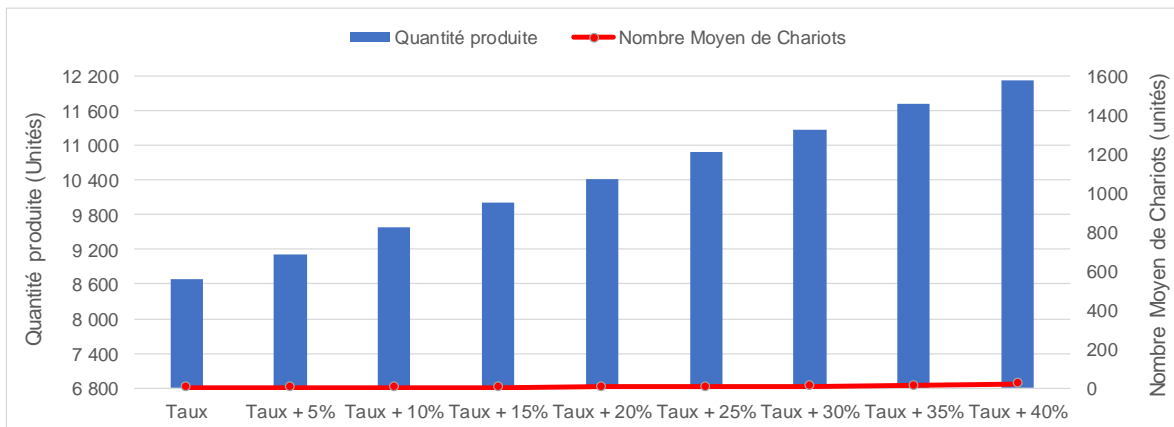


Figure 14 - Résultats pour le scénario "Guides Lasers" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)

Tableau 26 - Résultats pour le scénario "Guides Lasers" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%	Taux + 20%	Taux + 25%	Taux + 30%	Taux + 35%	Taux + 40%
Quantité produite (u.)	Moyenne	8677	9123	9581	10010	10422	10880	11283	11733	12136
	½ IC	36	36	36	35	43	34	42	40	48
NMC (u.)	Moyenne	2.0	2.3	2.7	3.4	4.1	5.3	7.5	11.2	21.4
	½ IC	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.5	0.8	2.5

Les tableaux 27 et 28 ainsi que les figures 15 et 16 ci-dessous montrent les taux d'occupation des opérateurs puis des postes de production. On observe notamment qu'un

écart se crée entre les taux d'occupation du poste de Pré-assemblage et du poste d'assemblage 1. Le poste de pré-assemblage agit ici comme un goulot d'étranglement pour l'atelier de production des panneaux de murs. On peut donc déduire que c'est ce poste de production qui provoque une augmentation du NMC. Ainsi, traiter ce problème pourrait éventuellement permettre de supporter une hausse de la demande plus importante.

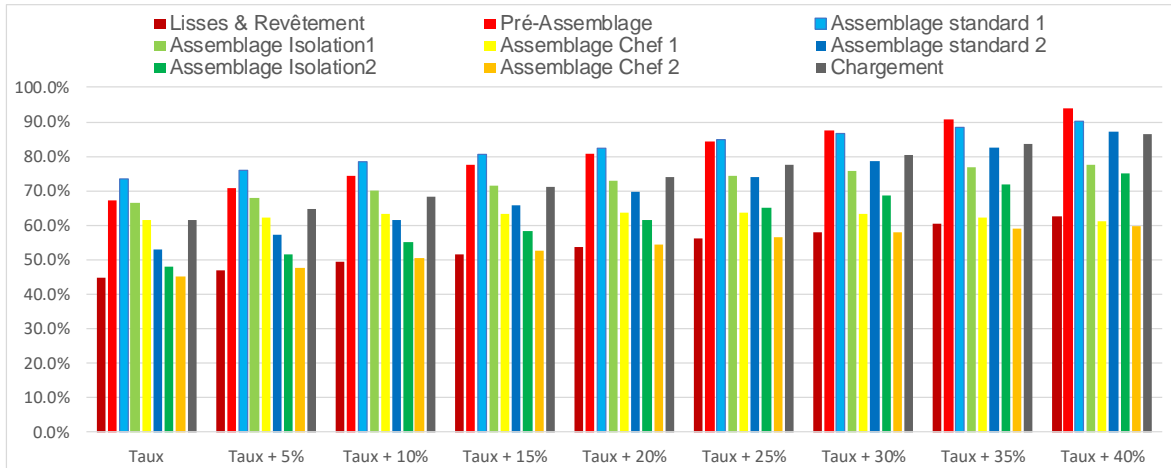


Figure 15 - Résultats pour le scénario " Guides Lasers" - Taux d'occupation des opérateurs

Tableau 27 - Résultats pour le scénario " Guides Lasers" - Taux d'occupation des opérateurs

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%	Taux + 20%	Taux + 25%	Taux + 30%	Taux + 35%	Taux + 40%
Lisses & Revêtement	Moyenne	44.6%	47.0%	49.3%	51.6%	53.6%	56.0%	58.1%	60.3%	62.6%
	½ IC	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
Pré-Assemblage	Moyenne	67.2%	70.6%	74.2%	77.5%	80.7%	84.2%	87.4%	90.8%	94.0%
	½ IC	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.4%
Assemblage standard 1	Moyenne	73.5%	75.8%	78.4%	80.5%	82.5%	84.8%	86.7%	88.4%	90.1%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.3%	0.2%	0.3%
Assemblage Isolation1	Moyenne	66.4%	68.1%	70.1%	71.6%	72.9%	74.5%	75.7%	76.7%	77.5%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%
Assemblage Chef 1	Moyenne	61.5%	62.2%	63.2%	63.4%	63.6%	63.6%	63.1%	62.3%	61.3%
	½ IC	0.1%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.1%	0.2%
Assemblage standard 2	Moyenne	53.1%	57.3%	61.6%	65.8%	69.6%	74.1%	78.6%	82.6%	87.3%
	½ IC	0.4%	0.4%	0.4%	0.5%	0.5%	0.4%	0.6%	0.5%	0.6%
Assemblage Isolation2	Moyenne	47.8%	51.4%	54.9%	58.4%	61.5%	65.1%	68.5%	71.7%	75.2%
	½ IC	0.4%	0.3%	0.3%	0.4%	0.4%	0.4%	0.5%	0.4%	0.4%
Assemblage Chef 2	Moyenne	45.0%	47.7%	50.4%	52.6%	54.5%	56.4%	58.0%	58.8%	59.8%
	½ IC	0.3%	0.3%	0.2%	0.3%	0.3%	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%
Chargement	Moyenne	61.6%	64.8%	68.1%	71.2%	74.1%	77.4%	80.3%	83.5%	86.3%
	½ IC	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.2%	0.3%	0.3%	0.3%

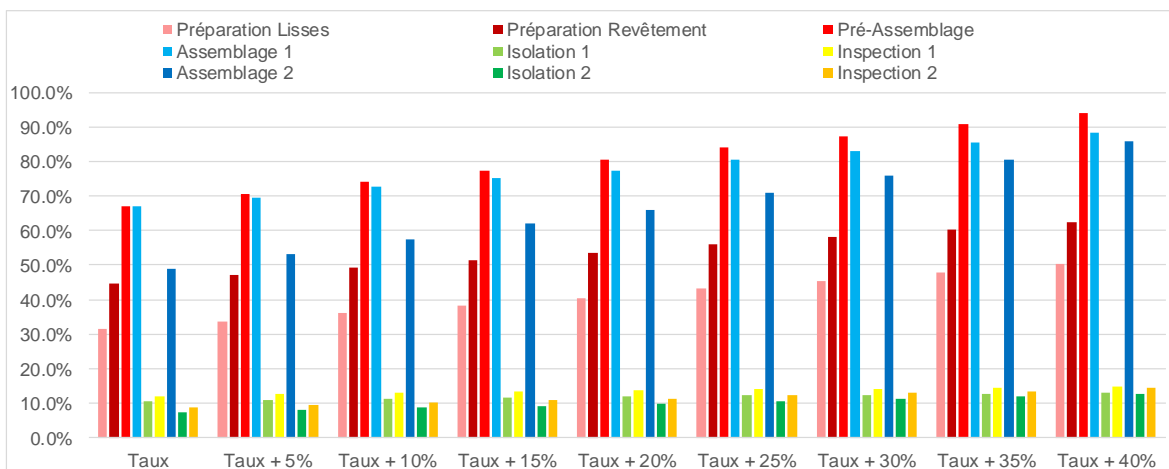


Figure 16 - Résultats pour le scénario "Guides Lasers" - Taux d'occupation des postes de production

Tableau 28 - Résultats pour le scénario "Guides Lasers" - Taux d'occupation des postes de production

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%	Taux + 20%	Taux + 25%	Taux + 30%	Taux + 35%	Taux + 40%
Préparation Lisses	Moyenne	31.4%	33.6%	36.0%	38.3%	40.5%	43.1%	45.3%	47.8%	50.4%
	½ IC	0.3%	0.2%	0.2%	0.3%	0.3%	0.3%	0.4%	0.3%	0.3%
Préparation Revêtement	Moyenne	44.6%	47.0%	49.3%	51.6%	53.6%	56.0%	58.1%	60.3%	62.6%
	½ IC	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
Pré-Assemblage	Moyenne	67.2%	70.6%	74.2%	77.5%	80.7%	84.2%	87.4%	90.8%	94.0%
	½ IC	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.4%
Assemblage 1	Moyenne	67.0%	69.6%	72.6%	75.1%	77.5%	80.4%	83.1%	85.7%	88.5%
	½ IC	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.4%	0.4%	0.4%
Isolation 1	Moyenne	10.5%	11.0%	11.3%	11.7%	12.1%	12.2%	12.4%	12.7%	12.9%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Inspection 1	Moyenne	12.1%	12.5%	12.9%	13.3%	13.6%	13.9%	14.2%	14.5%	14.7%
	½ IC	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%
Assemblage 2	Moyenne	48.9%	53.2%	57.6%	62.0%	66.0%	70.8%	75.8%	80.4%	85.9%
	½ IC	0.5%	0.4%	0.4%	0.5%	0.6%	0.5%	0.7%	0.6%	0.7%
Isolation 2	Moyenne	7.5%	8.0%	8.6%	9.3%	9.8%	10.6%	11.2%	11.8%	12.5%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%	0.1%
Inspection 2	Moyenne	8.7%	9.4%	10.1%	10.8%	11.4%	12.1%	12.9%	13.5%	14.3%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%

5.1.4 Table de pré-assemblage

Cette amélioration consiste à augmenter le niveau de pré-assemblage des ouvertures. Ainsi c'est une partie du temps actuellement dédié à l'assemblage qui est reporté dans le temps de production dédié au pré-assemblage.

La Figure 17 et le Tableau 29 présentent l'évolution des quantités produites et du NMC en fonction des différents scénarios. Il s'avère que le système devient tout de suite saturé avec cette modification. En effet, la quantité produite reste inchangée entre deux taux d'arrivée différents tandis que le NMC croît fortement.

Tableau 29 - Résultats pour le scénario "Table de pré-assemblage" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%
Quantité produite (u.)	Moyenne	6815	6814	6815	6814
	½ IC	14	14	14	14
NMC (u.)	Moyenne	952.5	1170.9	1387.5	1604.9
	½ IC	24.0	24.6	25.4	25.8

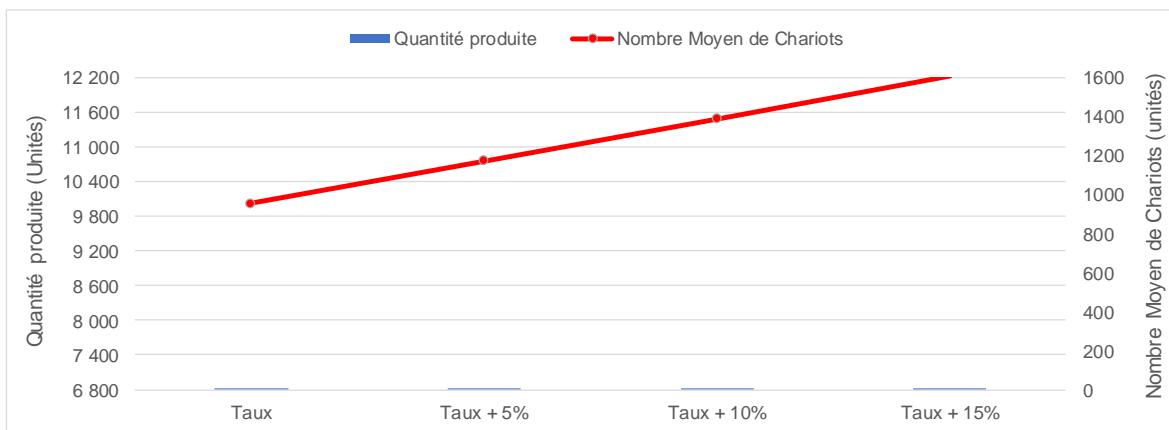


Figure 17 - Résultats pour le scénario "Table de pré-assemblage" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)

À l'aide des tableaux 30 et 31 et des figures 18 et 19 ci-dessous, on peut observer que le poste de pré-assemblage de la production et son opérateur attiré sont saturés (taux d'occupation de 100%). Il semblerait donc que le transfert d'une partie de la charge de travail des deux postes d'assemblage vers le poste de pré-assemblage vienne surcharger le poste de pré-assemblage. Cela explique que la quantité produite n'augmente pas avec le taux d'arrivée. En effet, cette modification crée un goulot d'étranglement très contraignant ne permettant même pas de répondre à la demande actuelle. Cette amélioration supposée n'est donc pas une du tout. Il est alors inutile de poursuivre cette avenue.

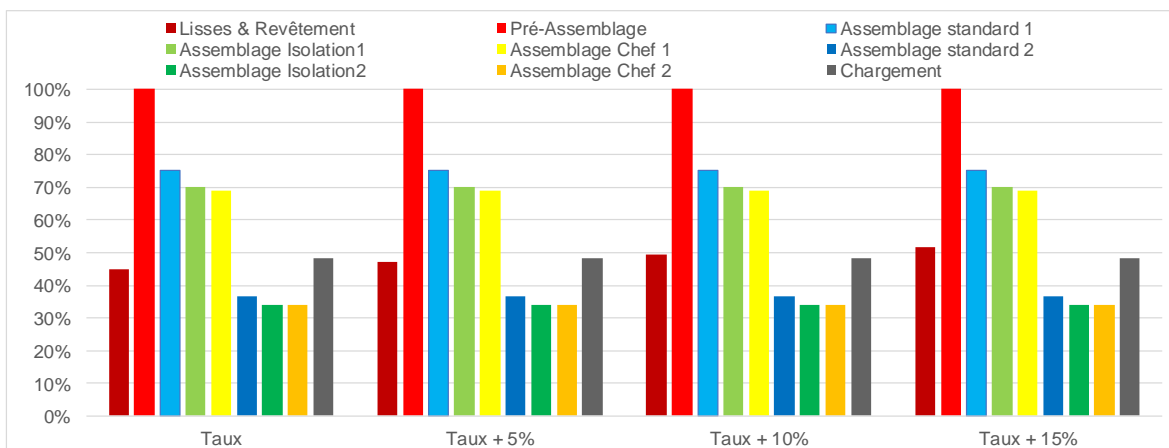


Figure 18 - Résultats pour le scénario " Table de pré-assemblage" - Taux d'occupation des opérateurs

Tableau 30 - Résultats pour le scénario " Table de pré-assemblage" - Taux d'occupation des opérateurs

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%
Lisses & Revêtement	Moyenne	44.8%	47.0%	49.3%	51.5%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
Pré-Assemblage	Moyenne	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	½ IC	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Assemblage standard 1	Moyenne	75.0%	75.0%	75.0%	75.0%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Assemblage Isolation1	Moyenne	70.2%	70.2%	70.2%	70.2%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Assemblage Chef 1	Moyenne	68.8%	68.8%	68.8%	68.8%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Assemblage standard 2	Moyenne	36.5%	36.5%	36.5%	36.5%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
Assemblage Isolation2	Moyenne	33.8%	33.8%	33.8%	33.8%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
Assemblage Chef 2	Moyenne	33.9%	33.9%	33.9%	34.0%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
Chargement	Moyenne	48.4%	48.4%	48.4%	48.4%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%

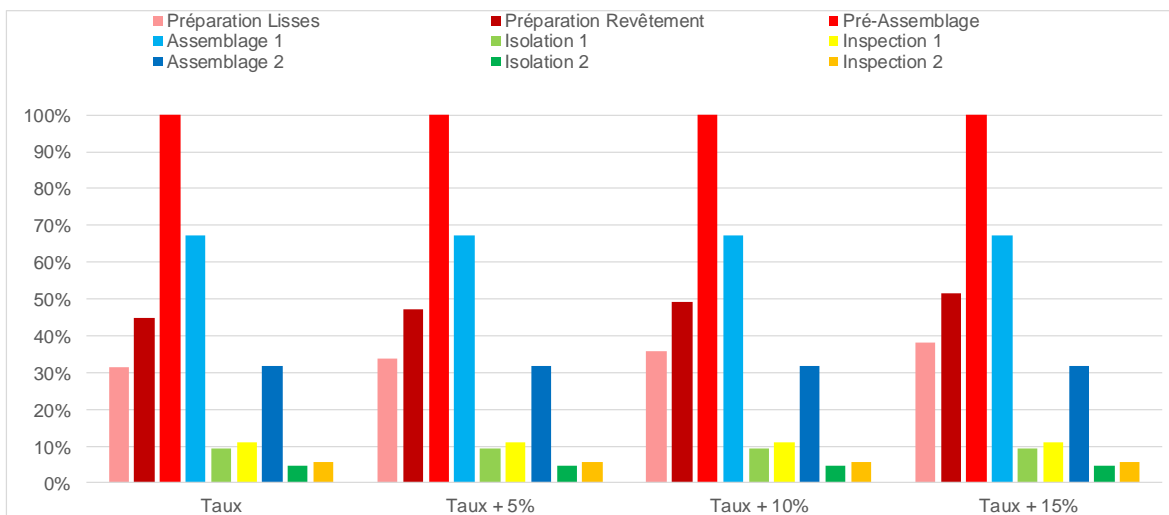


Figure 19- Résultats pour le scénario " Table de pré-assemblage" - Taux d'occupation des postes de production

Tableau 31- Résultats pour le scénario " Table de pré-assemblage" - Taux d'occupation des postes de production

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%
Préparation Lisses	Moyenne	31.5%	33.7%	35.9%	38.2%
	½ IC	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
Préparation Revêtement	Moyenne	44.8%	47.0%	49.3%	51.5%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
Pré-Assemblage	Moyenne	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	½ IC	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Assemblage 1	Moyenne	67.2%	67.2%	67.2%	67.2%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Isolation 1	Moyenne	9.4%	9.4%	9.4%	9.4%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Inspection 1	Moyenne	10.9%	10.9%	10.9%	10.9%
	½ IC	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Assemblage 2	Moyenne	31.7%	31.7%	31.7%	31.7%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
Isolation 2	Moyenne	4.6%	4.7%	4.6%	4.7%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Inspection 2	Moyenne	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%
	½ IC	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

5.1.5 Poste de préparation des entremises

Cette amélioration consiste à ajouter un poste de production afin de réduire la charge de travail du poste d'assemblage. Un nouveau poste de production a donc été ajouté et le temps de production afférent au poste d'assemblage a été réduit. C'est l'opérateur Lisses & Revêtement qui est en charge de ce nouveau poste.

Pour ce scénario, on observe dans le Tableau 32 et sur la Figure 20 une augmentation significative des quantités produites jusqu'au scénario *Taux + 25%*. Pour les taux d'arrivée suivants, un maximum de capacité de production semble être atteint, la quantité produite stagne et le nombre moyen de chariots augmente fortement. Il y a toutefois dès le scénario *Taux + 20%*, un NMC trop élevé. Cette amélioration semble donc limitée.

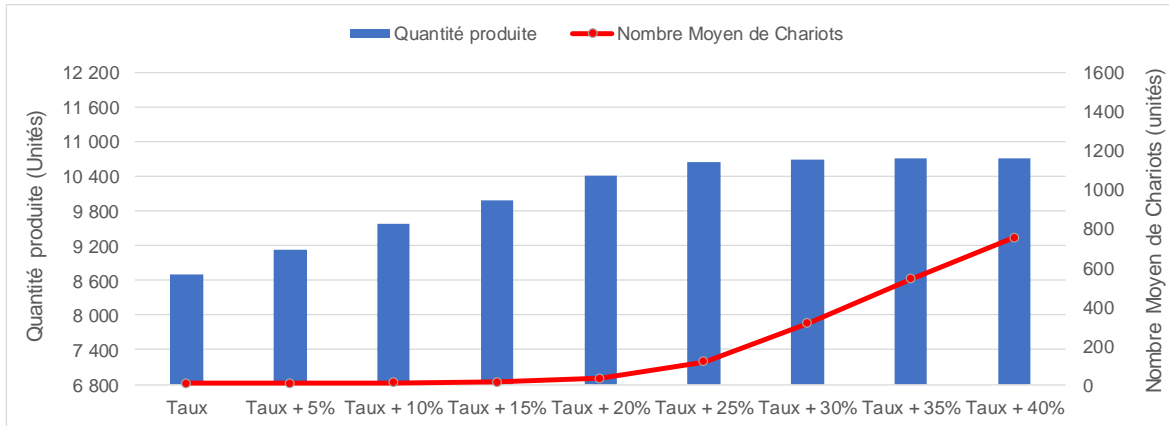


Figure 20 - Résultats pour le scénario "Poste de préparation des entremises" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)

Tableau 32 - Résultats pour le scénario "Poste de préparation des entremises" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%	Taux + 20%	Taux + 25%	Taux + 30%	Taux + 35%	Taux + 40%
Quantité produite (u.)	Moyenne	8705	9138	9578	9979	10414	10647	10678	10707	10698
	½ IC	29	36	41	31	36	33	38	25	28
NMC (u.)	Moyenne	3.7	4.9	7.1	12.1	30.0	117.3	312.0	538.2	750.9
	½ IC	0.1	0.2	0.5	1.2	5.5	21.2	24.8	21.5	30.4

Les tableaux 33 et 34 de même que les figures 21 et 22 ci-dessous montrent les taux d'occupation des opérateurs et postes de production. Tout d'abord, il est important de noter que le taux d'occupation de l'opérateur *Lisses & Revêtement* ayant ici la tâche supplémentaire de la préparation des entremises n'est pas trop élevé. Il reste même malgré tout l'opérateur le moins occupé.

Les taux d'occupation des postes d'assemblage plafonnant autour de 97,5% pour les quatre derniers taux d'arrivée confirment que l'atelier atteint un maximum de capacité. Il est intéressant de noter que les taux d'occupation des postes de production en amont des postes d'assemblage (Préparation des Lisses, Préparation du Revêtement, Pré-assemblage et Préparation des entremises) continuent d'augmenter tandis que les taux

d'occupation des postes en aval (Isolation et Inspection) restent à un palier. Cela explique notamment l'accroissement du NMC. Le poste d'assemblage agit donc ici en tant que goulot d'étranglement pour le flux de production.

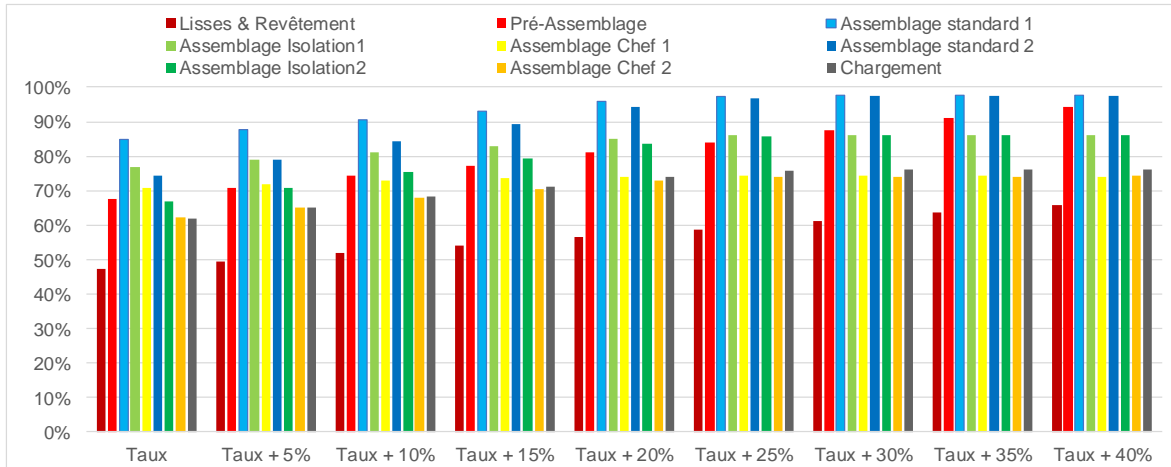


Figure 21 - Résultats pour le scénario " Poste de préparation des entremises" - Taux d'occupation des opérateurs

Tableau 33 - Résultats pour le scénario " Poste de préparation des entremises" - Taux d'occupation des opérateurs

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%	Taux + 20%	Taux + 25%	Taux + 30%	Taux + 35%	Taux + 40%
Lisses & Revêtement	Moyenne	47.1%	49.3%	51.9%	54.1%	56.5%	58.6%	61.1%	63.5%	65.7%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%	0.3%
Pré-Assemblage	Moyenne	67.4%	70.8%	74.2%	77.4%	80.9%	83.9%	87.4%	91.1%	94.2%
	½ IC	0.2%	0.3%	0.3%	0.2%	0.3%	0.4%	0.2%	0.3%	0.4%
Assemblage standard 1	Moyenne	84.8%	87.5%	90.5%	93.2%	95.9%	97.3%	97.6%	97.6%	97.5%
	½ IC	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Assemblage Isolation1	Moyenne	76.7%	78.8%	81.0%	83.0%	85.0%	85.9%	86.2%	86.1%	86.1%
	½ IC	0.3%	0.2%	0.3%	0.3%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Assemblage Chef 1	Moyenne	70.9%	72.0%	72.8%	73.7%	74.0%	74.2%	74.2%	74.2%	74.1%
	½ IC	0.2%	0.1%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
Assemblage standard 2	Moyenne	74.2%	79.1%	84.3%	89.3%	94.2%	96.9%	97.4%	97.5%	97.6%
	½ IC	0.5%	0.5%	0.6%	0.5%	0.4%	0.3%	0.1%	0.1%	0.1%
Assemblage Isolation2	Moyenne	67.0%	70.9%	75.3%	79.4%	83.4%	85.6%	86.0%	86.0%	86.1%
	½ IC	0.5%	0.4%	0.5%	0.5%	0.4%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%
Assemblage Chef 2	Moyenne	62.1%	64.9%	67.8%	70.5%	72.8%	73.8%	74.1%	74.1%	74.2%
	½ IC	0.4%	0.4%	0.4%	0.3%	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
Chargement	Moyenne	61.9%	65.0%	68.1%	71.0%	74.1%	75.8%	76.0%	76.2%	76.1%
	½ IC	0.2%	0.3%	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%

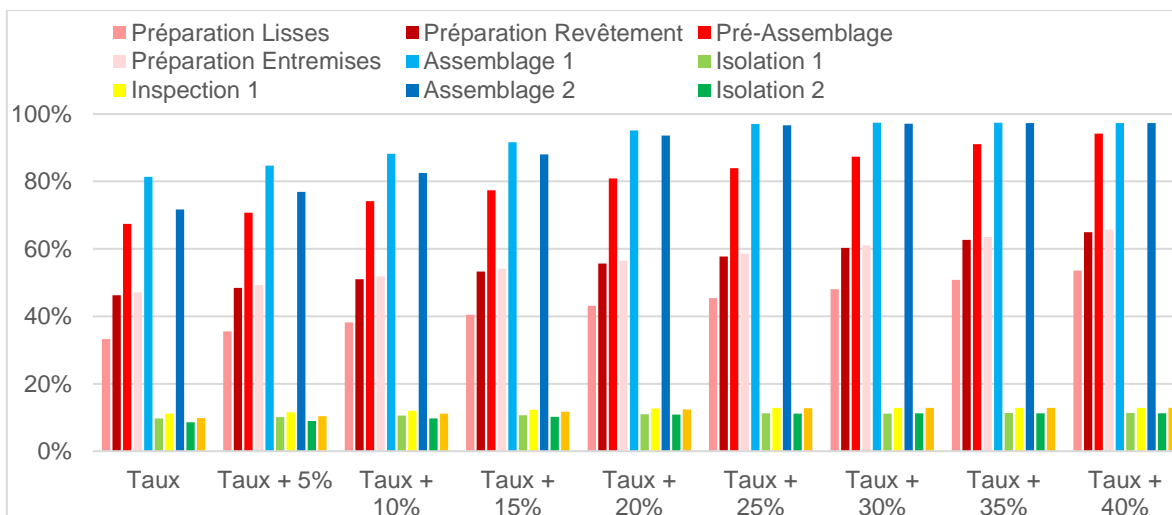


Figure 22 - Résultats pour le scénario "Poste de préparation des entremises" - Taux d'occupation des postes de production

Tableau 34 - Résultats pour le scénario "Poste de préparation des entremises" - Taux d'occupation des postes de production

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%	Taux + 20%	Taux + 25%	Taux + 30%	Taux + 35%	Taux + 40%
Préparation Lisses	Moyenne	33.3%	35.5%	38.1%	40.5%	43.1%	45.4%	48.1%	50.8%	53.6%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.2%	0.3%	0.4%
Préparation Revêtement	Moyenne	46.2%	48.4%	51.0%	53.3%	55.7%	57.8%	60.3%	62.7%	65.0%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%	0.3%
Pré-Assemblage	Moyenne	67.4%	70.8%	74.2%	77.4%	80.9%	83.9%	87.4%	91.1%	94.2%
	½ IC	0.2%	0.3%	0.3%	0.2%	0.3%	0.4%	0.2%	0.3%	0.4%
Préparation Entremises	Moyenne	47.1%	49.3%	51.9%	54.1%	56.5%	58.6%	61.1%	63.5%	65.7%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%	0.3%
Assemblage 1	Moyenne	81.4%	84.7%	88.2%	91.6%	95.2%	97.0%	97.4%	97.4%	97.4%
	½ IC	0.3%	0.3%	0.4%	0.4%	0.3%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%
Isolation 1	Moyenne	9.7%	10.1%	10.5%	10.7%	11.0%	11.2%	11.2%	11.3%	11.3%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%
Inspection 1	Moyenne	11.2%	11.5%	12.0%	12.3%	12.6%	12.8%	12.8%	12.8%	12.9%
	½ IC	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Assemblage 2	Moyenne	71.7%	76.9%	82.6%	88.0%	93.6%	96.7%	97.2%	97.3%	97.3%
	½ IC	0.6%	0.6%	0.7%	0.6%	0.5%	0.3%	0.1%	0.1%	0.1%
Isolation 2	Moyenne	8.5%	8.9%	9.7%	10.2%	10.8%	11.1%	11.3%	11.2%	11.2%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%
Inspection 2	Moyenne	9.8%	10.4%	11.1%	11.7%	12.4%	12.8%	12.8%	12.8%	12.8%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%

5.1.6 Automate d'assemblage

Cette amélioration consiste en l'automatisation partielle du poste d'assemblage. Pour le bon fonctionnement de l'automate, il est nécessaire d'ajouter un poste de préparation des entremises. Le poste d'assemblage n'est traité plus que par l'opérateur Assemblage Standard et les Opérateurs *Assemblage Isolation 1 et 2* et *Assemblage Chef 1 et 2* sont attirés à la préparation des entremises sur la base du premier disponible.

On observe via le Tableau 35 et la Figure 23 une augmentation significative de la quantité produite pour tous les scénarios, alors que le nombre moyen de chariots reste inférieur à 18. Tous les taux d'arrivée testés s'avèrent donc réalisables.

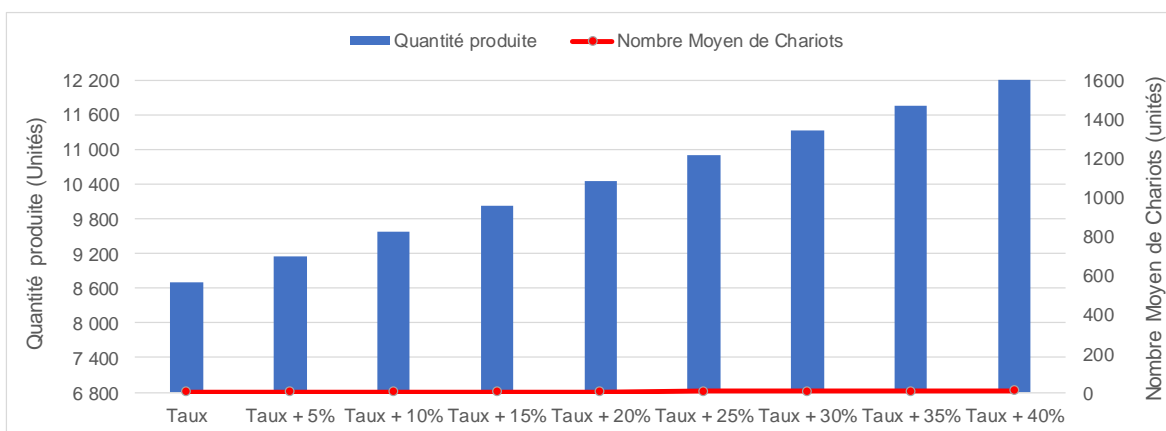


Figure 23 - Résultats pour le scénario "Automate d'assemblage" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)

Tableau 35 - Résultats pour le scénario "Automate d'assemblage" - Quantités (unités) et Nombre moyen de chariots (unités)

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%	Taux + 20%	Taux + 25%	Taux + 30%	Taux + 35%	Taux + 40%
Quantité produite (u.)	Moyenne	8710	9150	9587	10028	10459	10898	11327	11763	12194
	½ IC	35	36	36	34	34	34	32	36	38
NMC (u.)	Moyenne	1.7	1.9	2.2	2.6	3.0	3.7	4.6	6.4	9.7
	½ IC	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.6

Les taux d'occupation, observables sur les tableaux 36 et 37 et les figures 24 et 25 ci-dessous, montrent que le goulot d'étranglement du flux de production se trouve au niveau du poste de pré-assemblage. On peut noter aussi que le taux d'occupation de l'opérateur de *chargement* est le second le plus élevé. Par ailleurs, il est important de noter que les taux d'occupation des opérateurs *Assemblage Isolation 1 et 2* et *Assemblage chef 1 et 2*,

assignés ici à la préparation des entremises, restent raisonnable et sont même les plus bas. Dans l'optique de répondre à une hausse de la demande plus importante, il pourrait être envisageable de doubler le poste de pré-assemblage et de réorganiser les tâches des opérateurs afin de ne pas en surcharger un et donc de gagner en efficacité.

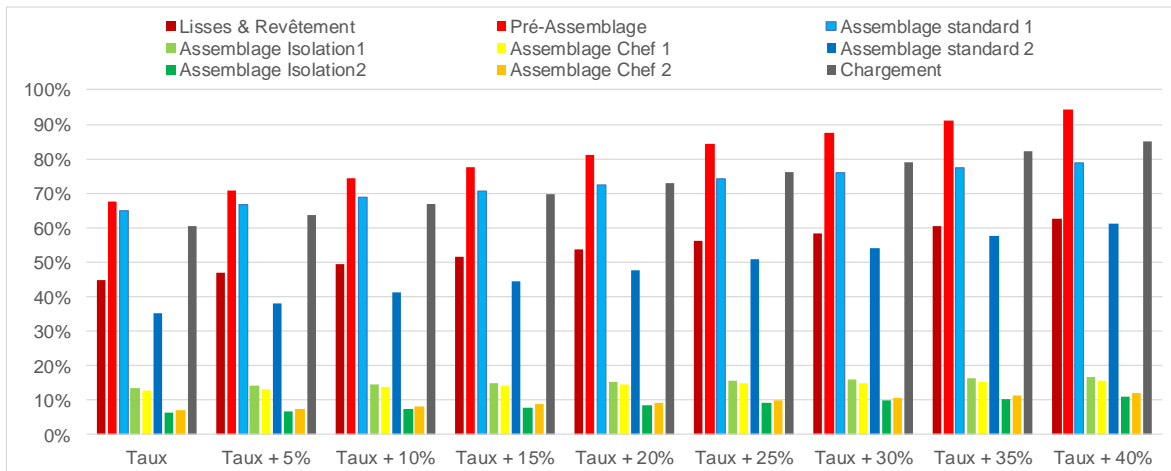


Figure 24 - Résultats pour le scénario "Automate d'assemblage" - Taux d'occupation des opérateurs

Tableau 36 - Résultats pour le scénario "Automate d'assemblage" - Taux d'occupation des opérateurs

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%	Taux + 20%	Taux + 25%	Taux + 30%	Taux + 35%	Taux + 40%
Lisses & Revêtement	Moyenne	44.7%	47.0%	49.2%	51.5%	53.8%	56.0%	58.2%	60.5%	62.7%
	½ IC	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
Pré-Assemblage	Moyenne	67.4%	70.8%	74.2%	77.6%	80.9%	84.3%	87.7%	91.0%	94.4%
	½ IC	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
Assemblage standard 1	Moyenne	64.7%	66.8%	68.8%	70.6%	72.4%	74.2%	75.8%	77.2%	78.7%
	½ IC	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
Assemblage Isolation 1	Moyenne	13.5%	14.0%	14.4%	14.8%	15.3%	15.6%	15.9%	16.3%	16.7%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%
Assemblage Chef 1	Moyenne	12.8%	13.2%	13.6%	14.0%	14.3%	14.6%	15.0%	15.3%	15.5%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%
Assemblage standard 2	Moyenne	35.1%	38.1%	41.1%	44.3%	47.5%	50.8%	54.0%	57.6%	61.2%
	½ IC	0.3%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.5%	0.4%	0.5%	0.5%
Assemblage Isolation 2	Moyenne	6.2%	6.7%	7.3%	7.8%	8.4%	9.0%	9.7%	10.2%	10.9%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%	0.2%
Assemblage Chef 2	Moyenne	6.8%	7.4%	8.0%	8.7%	9.3%	9.9%	10.6%	11.3%	12.0%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Chargement	Moyenne	60.6%	63.7%	66.7%	69.8%	72.9%	75.9%	79.0%	82.0%	85.0%
	½ IC	0.3%	0.3%	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.3%	0.3%

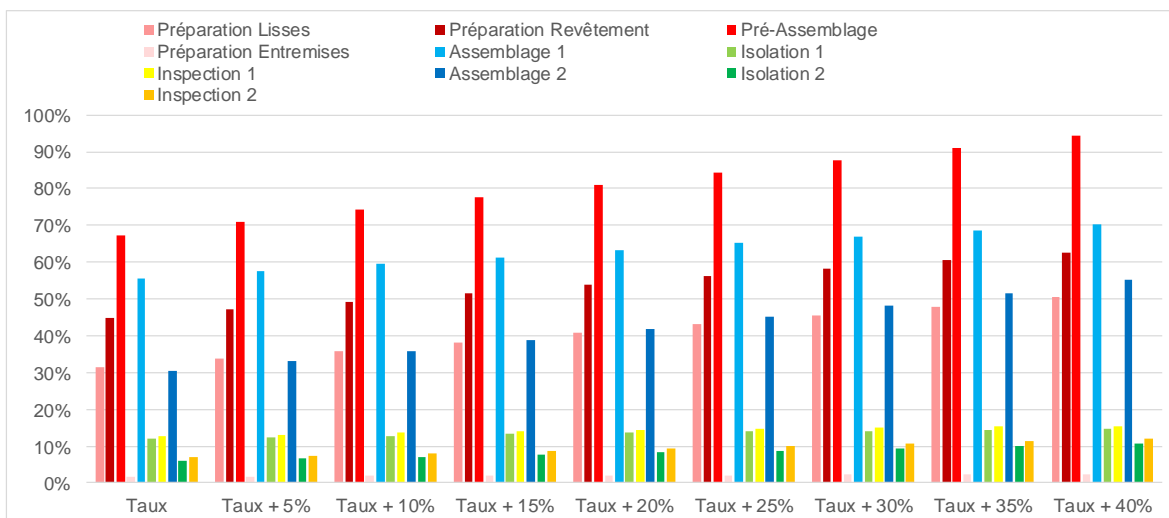


Figure 25 - Résultats pour le scénario "Automate d'assemblage" - Taux d'occupation des postes de production

Tableau 37- Résultats pour le scénario "Automate d'assemblage" - Taux d'occupation des postes de production

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%	Taux + 20%	Taux + 25%	Taux + 30%	Taux + 35%	Taux + 40%
Préparation Lisses	Moyenne	31.5%	33.7%	35.9%	38.3%	40.6%	43.1%	45.4%	48.0%	50.6%
	½ IC	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
Préparation Revêtement	Moyenne	44.7%	47.0%	49.2%	51.5%	53.8%	56.0%	58.2%	60.5%	62.7%
	½ IC	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
Pré-Assemblage	Moyenne	67.4%	70.8%	74.2%	77.6%	80.9%	84.3%	87.7%	91.0%	94.4%
	½ IC	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
Préparation Entremises	Moyenne	1.7%	1.8%	1.8%	1.9%	2.0%	2.1%	2.2%	2.2%	2.3%
	½ IC	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Assemblage 1	Moyenne	55.4%	57.5%	59.4%	61.3%	63.2%	65.1%	66.9%	68.6%	70.3%
	½ IC	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%	0.3%	0.3%	0.3%	0.2%	0.3%
Isolation 1	Moyenne	12.1%	12.5%	12.8%	13.2%	13.6%	13.9%	14.1%	14.4%	14.7%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%
Inspection 1	Moyenne	12.8%	13.2%	13.6%	13.9%	14.3%	14.6%	14.9%	15.2%	15.5%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%
Assemblage 2	Moyenne	30.3%	33.0%	35.8%	38.8%	41.8%	45.0%	48.1%	51.6%	55.1%
	½ IC	0.3%	0.4%	0.4%	0.4%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%
Isolation 2	Moyenne	6.0%	6.5%	7.1%	7.6%	8.2%	8.8%	9.4%	9.9%	10.6%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%	0.2%
Inspection 2	Moyenne	6.8%	7.4%	8.0%	8.7%	9.3%	9.9%	10.6%	11.3%	12.0%
	½ IC	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%

5.2 Comparaison des scénarios

Après avoir analysé les résultats de chaque scénario, il devient intéressant de les comparer entre eux de même que par rapport au scénario *Existant*. Le Tableau 38 montre l'évolution de l'indicateur *quantité produite* de chaque scénario par rapport au scénario *Existant*,

suivant chaque taux d'arrivée testé. Par exemple, pour le scénario *Guides lasers*, l'augmentation de 20% du taux d'arrivée (*Taux+20%*) présente une évolution de $(10422-9928)/9928 = +5.0\%$ par rapport à ce que pourrait faire le système existant. Le tableau met aussi en relation cette évolution avec le nombre moyen de chariots correspondant. Ainsi, il est possible de visualiser quelle amélioration est viable en combinant ces deux indicateurs.

À la lumière des taux d'occupation des postes de production présentés dans la section précédente, le

Tableau 39 indique pour chaque scénario le ou les poste(s) qui agissent comme goulot d'étranglement pour le flux de production. Un goulot d'étranglement est défini comme étant le poste de production le plus chargé, c'est donc ce poste de production qui limite la capacité de production à la chaîne de production complète. Un goulot ne varie pas tant qu'on ne modifie pas le processus de production d'une quelconque manière. Ainsi, peu importe le taux d'arrivée, le goulot sera le même. C'est pourquoi ils ne sont présentés qu'en fonction des scénarios.

Les scénarios *Familles de produits* et *Table de pré-assemblage* ne peuvent pas être retenus dans l'état actuel. Pour le premier scénario, comme expliqué ci-haut (Section 5.1.2), il faudrait prendre le temps de faire refléter la saisonnalité de la production dans le modèle de simulation pour conclure définitivement sur cette modification. En effet, aucune amélioration n'est observable par rapport au scénario *Existant*, les quantités produites restent semblables et les goulots constitués par les postes d'assemblages demeurent inchangés. Pour la seconde modification, elle ne fait qu'empirer les résultats. Il faudrait reconsidérer cette option en doublant le poste de pré-assemblage, devenu le goulot du flux de production. Cependant, cela impliquerait de faire appel à de la main-d'œuvre supplémentaire, ce qui est contraire à l'objectif de cette recherche qui est de réduire le besoin en ressources humaines.

Il est à noter qu'aucune amélioration ne paraît intéressante pour une augmentation de 5% de la demande. En effet, le système existant semble être en mesure de répondre à une telle augmentation de la demande. Néanmoins, il ne faut pas oublier que des hypothèses ont dû être posées et que la simulation ne prend pas en compte de quelconques imprévus ou certains facteurs humains (absence, baisse de motivation de la main d'œuvre, etc.) pouvant amener une baisse de productivité.

Tableau 38 - comparaison des scénarios simulés

Scénario		Taux	Taux + 5%	Taux + 10%	Taux + 15%	Taux + 20%	Taux + 25%	Taux + 30%	Taux + 35%	Taux + 40%	
Existant	Quantité produite	Moyenne	8690	9110	9554	9861	9928	9934	9937	9938	
		½ IC	30	36	40	30	34	34	34	34	35
	NMC	Moyenne	5.7	9.4	19.8	91.5	267.5	479.5	694.8	911.7	1128.5
		½ IC	0.3	0.9	3.6	20.1	29.4	31.1	31.9	32.4	32.8
Famille de produits	Quantité produite	Moyenne	8704	9145	9557	9867					
		½ IC	38	24	30	30					
		Évolution	-	-	-	-					
	NMC	Moyenne	5.9	9.4	20.4	86.9					
½ IC		0.4	0.6	4.8	17.3						
Guides lasers	Quantité produite	Moyenne	8677	9123	9581	10010	10422	10880	11283	11733	12136
		½ IC	36	36	36	35	43	34	42	40	48
		Évolution	-	-	-	+1.5%	+5.0%	+9.5%	+13.6%	+18.1%	+22.1%
	NMC	Moyenne	2.0	2.3	2.7	3.4	4.1	5.3	7.5	11.2	21.4
½ IC		0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.5	0.8	2.5	
Table de Pré-assemblage	Quantité produite	Moyenne	6815	6814	6815	6814					
		½ IC	14	14	14	14					
		Évolution	-21.6%	-25.2%	-28.7%	-30.9%					
	NMC	Moyenne	953	1171	1388	1605					
½ IC		24.0	24.6	25.4	25.8						
Poste de préparation entremises	Quantité produite	Moyenne	8705	9138	9578	9979	10414	10647	10678	10707	10698
		½ IC	29	36	41	31	36	33	38	25	28
		Évolution	-	-	-	+1.2%	+4.9%	+7.2%	+7.5%	+7.7%	+7.6%
	NMC	Moyenne	3.7	4.9	7.1	12.1	30.0	117.3	312.0	538.2	750.9
½ IC		0.1	0.2	0.5	1.2	5.5	21.2	24.8	21.5	30.4	
Automate d'assemblage	Quantité produite	Moyenne	8710	9150	9587	10028	10459	10898	11327	11763	12194
		½ IC	35	36	36	34	34	34	32	36	38
		Évolution	-	-	-	+1.7%	+5.3%	+9.7%	+14.0%	+18.4%	+22.7%
	NMC	Moyenne	1.7	1.9	2.2	2.6	3.0	3.7	4.6	6.4	9.7
½ IC		0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.6	
Légende											
Quantité produite - Évolution		≤0%	-	+0.1%	+1.0%	+2.0%	+5.0%	+10.0%	+15.0%	≥20.0%	
NMC - Moyenne		≤4	5	6	7	9	11	13	15	≥18	

Tableau 39 - Identification du poste goulot par scénario et par taux d'arrivée

Scénario	Poste(s) Goulot(s)
Existant	Assemblage 1 & 2
Famille de produits	Assemblage 1 & 2
Guides lasers	Pré-Assemblage
Table de Pré-assemblage	Pré-Assemblage
Poste de préparation des entremises	Assemblage 1 & 2
Automate d'assemblage	Pré-Assemblage

L'amélioration *Poste de préparation des entremises* peut permettre de répondre à une augmentation de 15% de la demande. En effet, jusqu'à ce niveau, le NMC reste raisonnable et la quantité produite est augmentée. On observe cependant que le goulot reste situé au même endroit que dans le scénario *Existant*. Si une plus forte hausse de la demande est à supporter, il faudra alors continuer de travailler sur les postes d'assemblages pour obtenir de meilleurs résultats.

Le scénario *Guides Lasers* montre que l'installation de lasers peut permettre de répondre à une augmentation de la demande jusqu'à 35%. En effet, au-delà, le NMC commence à trop augmenter, ce qui montre que l'atelier arrive à sa capacité maximale. Cette modification peut donc être intéressante à moyen terme si l'entreprise ne prévoit pas une hausse drastique de la demande. En effet, cette modification est mineure et relativement facile d'installation puisqu'elle ne demande pas de modification profonde du processus de production. Cela peut donc représenter une solution intermédiaire afin de permettre à la production de monter progressivement en capacité à moindres frais. On observe également que cette amélioration permet de déplacer les goulots d'étranglement constitués par les postes d'assemblage vers le poste de pré-assemblage. On en déduit donc que cette amélioration n'est pas utilisée à sa pleine capacité. Il faudrait donc travailler à l'amélioration de l'efficacité de ce nouveau goulot pour que l'atelier puisse encore gagner en efficacité.

Enfin, l'amélioration *Automate d'assemblage* permettrait d'avoir une augmentation significative de l'efficacité de l'atelier de production des panneaux de murs structuraux tout en gardant un contrôle sur le nombre d'encours. Les résultats de la simulation montrent en effet que jusqu'à une augmentation de 40% de la demande, le système continue de répondre aux besoins. On observe cependant une légère augmentation du NMC. De plus, on peut voir que le goulot devient le poste de pré-assemblage et qu'il y a d'autres opérateurs ayant un très faible taux d'occupation. Il serait donc possible de pallier cette augmentation du NMC en doublant le poste de pré-assemblage. Il faudrait alors envisager une redistribution des tâches parmi les opérateurs actuellement employés dans l'atelier de production des panneaux de murs.

Le Tableau 40 récapitule pour chaque proposition d'amélioration l'investissement nécessaire, la complexité de mise en place et la capacité de réponse à l'augmentation de la demande. Pour l'investissement et la complexité, il s'agit d'estimations qualitatives faites lors de la proposition des améliorations (cf. section 3.4.2). La capacité de réponse à la

demande est, quant à elle, déduite des résultats présentés précédemment dans cette section. Il est intéressant de noter ici que la capacité de réponse à la demande semble varier dans le même sens que l'investissement et la complexité d'installation de chaque modification. On peut donc supposer un retour sur investissement positif, notamment pour les améliorations *Guides lasers* et *Automate d'assemblage*. Il pourrait alors être très intéressant dans une prochaine étude d'évaluer de manière quantitative les investissements et retours sur investissement que chaque amélioration propose.

Tableau 40 - Évaluation des améliorations - investissement, complexité et réponse à la demande

Amélioration	Investissement	Complexité	Hausse de la demande supportée
Famille de produits	0	Très faible	0%
Écrans de guidage	+ (Écrans)	Faible	N/A
Table de pré-assemblage	+ (Table)	Faible	0%
Poste de préparation des entremises	+ (Établis ou table)	Faible	+15%
Guides lasers	++ (Viseurs lasers & logiciel)	Moyenne	+35%
Automate d'assemblage	+++ (Automate d'assemblage & logiciel)	Haute	≥ +40%

Étant donné la hausse de la demande et le manque de main-d'œuvre noté par le partenaire industriel de cette étude, Structures Ultratec, plusieurs options sont envisageables. Ils peuvent en effet choisir d'implémenter les scénarios *Poste de préparation des entremises*, *Guides lasers* ou *Automate d'assemblage*. Le choix dépendra de la stratégie choisie et des prévisions exactes à court terme et à long terme. De plus, l'entreprise aurait intérêt à mener une étude de coût avant de prendre une décision. En effet, si la hausse de la demande reste limitée pendant plusieurs années, il n'est peut-être pas nécessaire d'investir dans les équipements les plus onéreux dès maintenant.

Si l'investissement dans un automate semble justifié, il y a toutefois une étude de marché à mener. En effet, l'automate présenté n'est qu'une option permettant de donner un ordre de grandeur. Il existe plusieurs autres équipementiers qui peuvent proposer des versions différentes de ce type d'équipements. Ces versions peuvent mener à des résultats sensiblement différents et aussi avoir des coûts plus avantageux. Par ailleurs, la plupart des automates disponibles sur le marché demandent un niveau supérieur de préparation de

sous composant. Il est donc nécessaire de mettre en place un poste de préparation des entremises et parfois d'accroître le niveau de pré-assemblage des ouvertures en entrée de chaque poste d'assemblage. Comme il a pu être montré avec le scénario *Poste de préparation des entremises*, cela peut représenter une amélioration graduelle du flux de production. Toutefois pour pouvoir accroître le niveau de pré-assemblage des ouvertures, il faudra dédoubler le poste de pré-assemblage car le scénario *Table de pré-assemblage* a montré qu'un seul poste de pré-assemblage n'est pas en mesure de supporter ce changement.

Au-delà de ce qui a pu être traité dans cette étude, avant toute mise à niveau de la ligne de production des panneaux de murs, il faut s'assurer que les autres ateliers de l'entreprise sont aptes à suivre le rythme. En effet, pour produire plus de panneaux de murs, il faut dans un premier temps que l'atelier de coupe amont ait la capacité de production nécessaire et aussi que les bureaux de conception soient en mesure de fournir des plans à un rythme suffisamment élevé. Sinon tout investissement risque d'être vain.

Une telle étude aura permis de fournir une base de réflexion sur les possibilités d'améliorations réelles. En effet, la simulation a permis de donner des ordres de grandeur assez précis et concret des impacts de chaque proposition sur le niveau de production et sur le niveau d'utilisation des ressources associées. Bien que l'étude ne se prononce pas sur la rentabilité éventuelle des améliorations proposées, tout étude des coûts de chaque scénario est grandement facilitée par la simulation puisqu'elle fournit un chiffrage assez précis des impacts de chaque scénario.

On peut noter que ces résultats permettent par ailleurs de confirmer les propos avancés par (Branson *et al.*, 1990). En effet, on a pu montrer à l'aide la simulation que l'investissement dans les technologies disponibles, en l'occurrence un automate d'assemblage ou des lasers de guidage, amènerait un gain en efficacité pour le cas à l'étude.

Conclusion

Cette recherche avait pour but de faire un état des lieux de la gestion de la production dans la construction industrialisée, de s'intéresser aux solutions permettant d'améliorer la capacité de production d'une entreprise du secteur, puis d'utiliser la simulation pour étudier l'implémentation de ces améliorations et leur efficacité réelle pour un cas réel.

Une revue de littérature a alors permis de présenter le secteur de la construction préfabriquée en le comparant au secteur de la construction traditionnelle et au secteur manufacturier tout en relevant les problèmes majeurs et leurs solutions dédiées. Il s'avère que la construction industrialisée présente de nombreux avantages face à la construction traditionnelle, notamment apportés par une opportunité de standardisation. En effet, l'implémentation de flots de production permet de nombreuses avancées telles qu'un meilleur contrôle de la production, l'apport de nouvelles technologies ou de nouvelles méthodes de gestion. Ces dernières sont pour beaucoup issues du secteur manufacturier. Bien que présentant de fortes similitudes, la construction industrialisée ne peut être assimilée au secteur manufacturier car des différences majeures persistent. Elles résident principalement dans la culture projet qui, inhérente aux activités sur-site et au fort degré d'unicité des produits, demeurera toujours au minimum présente. De cette revue de la littérature, il ressort toutefois que les Méthodes Modernes de Construction (MMC) manquent encore de maturité. Les problèmes soulignés par les auteurs sont en effet liés à un manque de documentation et de communication au sein des entreprises et de leur chaîne logistique, à un trop faible développement des processus de contrôle de la production, à un manque d'investissement dans les technologies de fabrication et à une culture encore trop conservatrice, liée au secteur de la construction traditionnelle.

Un cas d'étude a ensuite permis d'observer un processus de production d'une entreprise du secteur de la construction préfabriquée, reposant sur la fabrication de panneaux de murs, et de relever les problèmes majeurs auxquels l'entreprise partenaire fait face. Des améliorations potentielles répondant notamment à un manque d'efficacité et de capacité de production tout en respectant certaines contraintes telles qu'une main-d'œuvre limitée en quantité ont alors été identifiées. Ces améliorations peuvent prendre plusieurs formes telles que des ajouts d'équipement (Guides lasers, écran de guidage, automate d'assemblage), des réaménagements (Table de pré-assemblage, poste de préparation des entremises) ou un réordonnancement des tâches (Famille de produits).

Afin de compléter l'étude de cas, un modèle de simulation a été développé en se fondant sur la modélisation du processus de production étudié. Il a permis d'évaluer la performance des améliorations proposées. Cette performance a été jugée sur la capacité à accroître le niveau de production du processus tout en s'assurant que certains indicateurs comme le niveau de stocks d'encours ou le taux d'occupation des opérateurs restent réalistes. Tout d'abord, cela a permis d'identifier quels scénarios sont réalisables et dans quelle mesure. Ensuite, cela a permis de montrer que selon les scénarios d'augmentation de la demande, toutes les améliorations ne sont pas viables. En effet, certaines améliorations peuvent permettre de supporter une augmentation modérée du niveau de la demande, soit environ 15%. Il s'agit dans notre cas de l'amélioration *Poste de préparation des entremises*. Le résultat modéré de cette amélioration s'explique par le fait que l'amélioration ne vient pas augmenter la capacité de la ligne de production, mais discrétise un peu plus ses opérations. Par ailleurs, d'autres améliorations permettraient d'augmenter davantage l'offre industrielle, de 35% et plus. Ces améliorations font appel à de nouvelles technologies, des viseurs lasers ou un automate d'assemblage, afin d'augmenter la productivité d'un poste de production qui est un goulot d'étranglement pour l'atelier, en l'occurrence, le poste d'*Assemblage de la structure*. On observe ainsi que plus le niveau de demande augmente, plus le changement doit être important pour pouvoir y répondre. Puisqu'en effet, ce sont principalement des ajouts d'équipements tels que des guides lasers ou un automate d'assemblage qui permettent une augmentation importante de la capacité de production.

Bien qu'amenant des résultats intéressants, cette étude de cas a ouvert la porte à de nombreuses perspectives d'évolution pour l'entreprise. Tout d'abord, les résultats pourraient être confortés en y ajoutant une dimension financière. En effet, toute une étude pourrait être menée sur les investissements, coûts d'exploitation et retours sur investissement que représente chaque amélioration. Cela permettrait de mesurer le risque financier de chaque amélioration, ce qui est nécessaire pour construire correctement une stratégie à long terme. Il faudrait alors y coupler une étude précise sur l'évolution de la demande en portant une attention particulière sur l'évolution du marché et de la concurrence ainsi que sur le cycle de vie des produits. Par ailleurs, un modèle de simulation étant ni plus ni moins une copie numérique des installations, il peut être constamment amélioré et affiné pour obtenir des résultats plus complets. Par exemple, certaines hypothèses simplificatrices sur les paramètres du modèle pourraient être précisées. Notamment, une étude de temps pourrait consolider les temps de production utilisés, les horaires de travail pourraient être

implémentés, des données sur les opérateurs et les machines pourraient être recueillies, afin d'inclure dans le modèle les taux d'absentéisme, de défaillance des machines, etc. Ou alors d'autres ateliers de production de l'usine, tels que l'atelier de coupe et celui de production des fermes de toit, pourraient être intégrés au même modèle. À terme, le modèle pourrait être utilisé comme jumeau numérique de l'usine (Piel *et al.*, 2018), ce qui représente un outil d'aide à la décision non négligeable pour les gestionnaires. Ce type d'outil s'inscrirait logiquement dans une stratégie d'industrie 4.0. Ce type de stratégie se développant de plus en plus, notamment dans le secteur manufacturier, secteur qui sert en quelque sorte de modèle à celui de la construction préfabriquée. Dans un autre domaine de compétence, une étude pourrait être menée sur la conception des produits afin d'apporter une plus grande standardisation dès la phase de design. Redéfinir ces processus permettrait d'apporter des concepts novateurs dans cette industrie tels que le *Design for X* ou l'intégration des fonctions de conception et de production. En plus d'une potentielle augmentation de la durée de vie des produits, un gain en efficacité pourrait être observé aussi bien dans les bureaux d'études que dans les ateliers de production en éliminant notamment la redondance dans les tâches effectuées pour chaque produit.

Le secteur de la construction industrialisée est encore jeune et de nombreuses voies sont donc encore à explorer pour les joueurs industriels de ce secteur.

Bibliographie

- »» ITALPRESSE. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <http://www.italpresse.it/pagina.php?cod=299>
- 2017 Exhibitors | BCMC Show. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <https://www.bcmcshow.com/17exhibitors>
- ALPHAMATIC Maschinenbau GmbH. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <http://www.alpha-matic.de/>
- Alpine – Products. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <http://alpineitw.com/products/>
- Altaf, M. S., Bouferguene, A., Liu, H., Al-Hussein, M., & Yu, H. (2018). Integrated production planning and control system for a panelized home prefabrication facility using simulation and RFID. *Automation in Construction*, 85, 369–383. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.09.009>
- Armocost, R. L., Componation, P. J., Mullens, M. A., & Swart, W. W. (1994). An AHP framework for prioritizing customer requirements in QFD: an industrialized housing application. *IIE Transactions*, 26(4), 72–79. <https://doi.org/10.1080/07408179408966620>
- Armocost, R., Mullens, M., & Swart, W. (1994a). Structuring a simulation modeling environment using a commercial manufacturing simulator. In *Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference, December 11, 1994 - December 14, 1994* (pp. 935–941). IEEE.
- Armocost, R., Mullens, M., & Swart, W. (1994b). The role of object oriented CAD in a generic simulator for the industrialized housing industry. In *Automation and Robotics in Construction XI. Proceedings of the 11th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), 24-26 May 1994* (pp. 171–178). Elsevier.
- Armocost, Robert, Componation, P., Mullens, M., & Swart, W. (1992). Customer requirements in industrialized housing. In *Proceedings of the 2nd Specialty Conference on Housing America in the Twenty-First Century, June 24, 1992 - June 26, 1992* (pp. 48–57). Publ by ASCE.
- Bildsten, L., Rehme, J., & Brege, S. (2010). Applying the kraljic model to the construction sector: The case of a prefab housing factory. In *26th Annual Conference of the Association of Researchers in Construction Management, ARCOM 2010, September 6, 2010 - September 8, 2010* (pp. 1029–1037). Association of Researchers in Construction Management, ARCOM.
- Branson, T. R., Elshennawy, A. K., Swart, W. W., & Chandra, S. (1990). Automation technologies for the industrialized housing manufacturing industry. *Proceedings of the 12th Annual Conference on Computers and Industrial Engineering, March 12, 1990 - March 14, 1990*, 19(1–4), 587–592.
- Broadway, R. S., & Mullens, M. A. (2004). Shop-floor information systems for industrialized housing production. In *IIE Annual Conference and Exhibition 2004, May 15, 2004 - May 19, 2004* (pp. 2203–2208). Institute of Industrial Engineers.
- Building Homes with Robots. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <http://www.williamsrobotics.com/products.html>
- Busching, H. W. (1977). NEW EQUIPMENT OF PRODUCTION AND CONSTRUCTION TO DECREASE THE COST OF PUBLIC HOUSING. *International Journal for Housing Science and Its Applications*, 1(1), 9–22.
- Cecobois - Comportement au feu. (2018). Retrieved August 14, 2018, from <https://cecobois.com/comportement-au-feu>
- Cecobois - Durabilité. (2018). Retrieved August 14, 2018, from <https://cecobois.com/durabilite>

- Cecobois - Écologique. (2018). Retrieved August 14, 2018, from <https://cecobois.com/ecologique>
- Cecobois - Propriétés Mécaniques. (2018). Retrieved August 14, 2018, from <https://cecobois.com/proprietes-mecaniques>
- Cecobois - Propriétés Physiques. (2018). Retrieved August 14, 2018, from <https://cecobois.com/proprietes-physiques>
- Cilento-Sarli, A. (1998). Technological tendencies in the production of homes. *Interciencia*, 23(1), 26-+.
- Clark Industries, Inc. Wood Truss and Component Manufacturing Equipment. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <http://www.clark-ind.com/>
- COMPONENT BUILDERS. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from http://panplus.com/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=60&Itemid=74
- Delemontey, Y. (2007). Le béton assemblé, Concrete assembly systems: Forms and figures in prefabrication in France, 1947-1952. *Histoire urbaine*, (20), 15–38. <https://doi.org/10.3917/rhu.020.0015>
- Egebo, T., Richardson, P., & Lienert, I. (1990). Modèles de l'investissement résidentiel pour les grands pays de l'OCDE. *Revue Économique de l'OCDE*, 14, 165–207.
- Équipements industriels et procédés automatisés uniques | ASI Innovation. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <http://asinnovation.ca/fr/produits/>
- FAOSTAT. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/FO/visualize>
- Gan, S. Q., Zhang, H., & Yang, Y. Z. (2014). The discuss of the development of residential industrialization in the new period. In *2014 International Conference on Frontiers of Advanced Materials and Engineering Technology, FAMET 2014, March 28, 2014 - March 29, 2014* (Vol. 912–914, pp. 1813–1816). Trans Tech Publications. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.912-914.1813>
- Gann, D. M. (1996). Construction as a manufacturing process? Similarities and differences between industrialized housing and car production in Japan. *Construction Management and Economics*, 14(5), 437–450. <https://doi.org/10.1080/014461996373304>
- Goulding, J., Nadim, W., Petridis, P., & Alshawi, M. (2012). Construction industry offsite production: A virtual reality interactive training environment prototype. *Advanced Engineering Informatics*, 26(1), 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.09.004>
- Hairstans, R. (2010). Timber offsite Modern Methods of Construction. In *11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010, June 20, 2010 - June 24, 2010* (Vol. 3, pp. 2006–2010). Trees and Timber Institute.
- Heravi, G., & Firoozi, M. (2017). Production process improvement of buildings prefabricated steel frames using value stream mapping. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(9–12), 3307–3321. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9306-9>
- HOMAG. (n.d.). Construction de maisons et taille de charpentes | HOMAG. Retrieved October 17, 2017, from <https%3A%2F%2Fwww.homag.com%2Ffr%2Fproduits%2Fconstruction-de-maisons-et-taille-de-charpentes%2F>
- Home. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <https://vektausa.com/>
- Hook, M., & Stehn, L. (2008). Applicability of lean principles and practices in industrialized housing production. *Construction Management and Economics*, 26(10), 1091–1100. <https://doi.org/10.1080/01446190802422179>

- Hundegger Woodworking Machines. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <http://www.hundegger.ca/>
- iN4 Solutions, Inc. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <http://www.in4solutionsinc.com/main.php?page=machinery>
- Johnsson, H., & Meiling, J. H. (2009). Defects in offsite construction: Timber module prefabrication. *Construction Management and Economics*, 27(7), 667–681. <https://doi.org/10.1080/01446190903002797>
- Kozlovska, M., & Spiakova, M. (2011). Modern methods of construction vs. construction waste. In *11th International Multidisciplinary Scientific Geoconference and EXPO, SGEM 2011, June 20, 2011 - June 25, 2011* (Vol. 3, pp. 483–490). International Multidisciplinary Scientific Geoconference and EXPO.
- La base de données de l'OCDE sur le logement abordable - OCDE. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <http://www.oecd.org/fr/social/base-de-donnees-logement-abordable.htm>
- Larousse, É. (n.d.). Définitions : simulation - Dictionnaire de français Larousse. Retrieved August 12, 2018, from <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/simulation/72824>
- Lopez del Corral, J. J. (2009). 156 Industrialized houses in Vitoria-Gasteiz. *Informes De La Construcción*, 61(513), 101–109. <https://doi.org/10.3989/ic.08.036>
- Lucas, R., Falrey, P., Garcia, R., & Lubliner, M. (2007). National energy savings potential in HUD-code housing from thermal envelope and HVAC equipment improvements. In *2007 ASHRAE Annual Meeting, June 23, 2007 - June 27, 2007* (Vol. 113 PART 2, pp. 62–69). Amer. Soc. Heating, Ref. Air-Conditioning Eng. Inc.
- Matériaux pour construire et rénover une maison | Matério. (n.d.). Retrieved October 25, 2017, from <http://www.materio.ca/>
- Mohsenijam, A., Soleimanifar, M., & Ming Lu. (2017). Simulation based process mapping for the fabrication of bridge girders. In *2017 Winter Simulation Conference (WSC), 3-6 Dec. 2017* (pp. 4522–4524). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WSC.2017.8248187>
- Nahmens, I., & Bindroo, V. (2011). Is customization fruitful in industrialized homebuilding industry? *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(12), 1027–1035. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000396](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000396)
- Naylor et Finger (1967) - Via (Sargent, 2013)
- Nield-Dumper, R. (2005). Car parks - New structures. *Concrete Engineering International*, 9(3), 52–53.
- Noguchi, M. (2005). Japanese manufacturers' "cost-performance" marketing strategy for the delivery of solar photovoltaic homes. In *Solar World Congress 2005: Bringing Water to the World, Including 34th ASES Annual Conference and 30th National Passive Solar Conference, August 6, 2005 - August 12, 2005* (Vol. 4, pp. 2341–2348). American Solar Energy Society.
- Pan, W., Gibb, A. G. F., & Dainty, A. R. J. (2008). Leading UK housebuilders' utilization of offsite construction methods. *Building Research and Information*, 36(1), 56–67. <https://doi.org/10.1080/09613210701204013>
- Piel, A., Benazouz, M., & Brunet, C. (2018). The digital Twin at the service of storage zone optimisation and assembly line simulation. In *12th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation, MOSIM18, June 27-29 2018*. Toulouse, France.
- Plant-Engineering - Prefabricated wooden house. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <https://www.lissmac.com/en/plant-engineering/prefabricated-wooden-house/>
- Products. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <http://www.desauw.net/Products.htm>
- Products – Wieder Maschinenbau – Veneer and Briquetting Presses | Scissor lifts. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <http://www.wieder-maschinenbau.eu/en/produkte/>

- Produkte - Wegoma. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <http://www.wegoma.de/products.html>
- Ruiz, A., & Gagliardi, J.-P. (2017). Cours MQT 7000 - Simulation de systèmes - Analyse des résultats.
- Sarden, Y., & Engstrom, S. (2010). Modern methods of construction: A solution for an industry characterized by uncertainty? In *26th Annual Conference of the Association of Researchers in Construction Management, ARCOM 2010, September 6, 2010 - September 8, 2010* (pp. 1101–1110). Association of Researchers in Construction Management, ARCOM.
- Sargent, R. G. (2013). Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation*, 7(1), 12–24. <https://doi.org/10.1057/jos.2012.20>
- Schruben (1980) - Via (Sargent, 2013)
- Search for Exhibitors and Products. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <http://www.ligna.de/en/exhibition/exhibitors-products/>
- Square 1 Design & Manufacture Inc. (n.d.-a). Retrieved October 17, 2017, from <http://www.square1design.com/spida.htm>
- Square 1 Design & Manufacture Inc. (n.d.-b). Retrieved October 17, 2017, from <http://www.square1design.com/mangotech.htm>
- Structural Building Components Magazine. (2017a, July). Truss Publications, Inc.
- Structural Building Components Magazine. (2017b, September). Truss Publications, Inc.
- Structural Framing: Construction: Framing & Assembly | Stiles Machinery. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <https://www.stilesmachinery.com/construction/structural-framing/framing-and-assembly>
- Taylor, M. D., Fisher, A., & Wamuziri, S. C. (2009). A comparison of modern methods of bathroom construction: A project case study. In *25th Annual Conference of the Association of Researchers in Construction Management, ARCOM 2009, September 7, 2009 - September 9, 2009* (pp. 1173–1182). Association of Researchers in Construction Management, ARCOM.
- tctautomationllc | OTHER MACHINES. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <http://www.tctautomation.com/machines>
- Tennant, S., McCarney, M., & Tong, M. K. L. (2012). Re-engineering the construction supply chain: Transferring on-site activity, offsite. In *28th Annual Conference of the Association of Researchers in Construction Management, ARCOM 2012, September 3, 2012 - September 5, 2012* (Vol. 2, pp. 739–749). Association of Researchers in Construction Management.
- The Koskovich Company. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <http://www.mii.com/koskovich/>
- Thuesen, C., & Hvam, L. (2011). Efficient on-site construction: learning points from a German platform for housing. *Construction Innovation*, 11(3), 338–355. <https://doi.org/10.1108/14714171111149043>
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- Wall Panel Products. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from http://www.mitek.ca/machinery/Wall_Panel_Equipment.aspx
- Wescana Industries - Welcome. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <http://www.wescana.ca/index.php>
- Wood Wall Panel Machinery - Triad Machines. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from http://www.triadmachines.com/wood_panel.html

World Housing - Industry Market Research, Market Share, Market Size, Sales, Demand Forecast, Market Leaders, Company Profiles, Industry Trends. (n.d.). Retrieved October 17, 2017, from <https://www.freedoniagroup.com/World-Housing.html>

Annexes

A	Diagrammes d'activités	95
B	Taux d'occurrence Hauteur et Longueur	105
C	Temps d'opération pour le processus de production des panneaux de murs	107
D	Processus de fabrication d'éléments préfabriqués : état de l'art et analyse d'un cas d'études	108

A Diagrammes d'activités

A.1 Détails du diagramme de processus de production des panneaux de murs

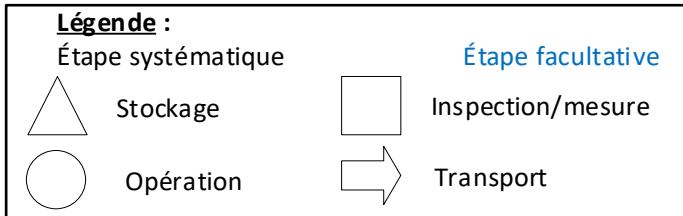
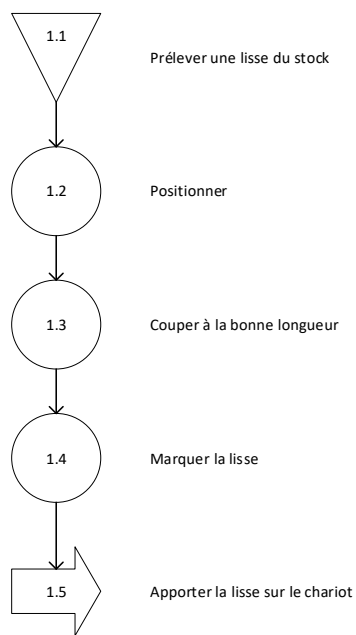


Figure 26 - Légende pour lecture des diagrammes de l'annexe A.1



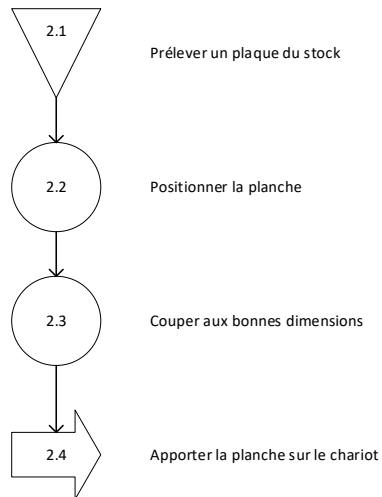
Processus à répéter pour chaque lisse

Longueur et quantité variable selon longueur

Temps standard :

Bande de plancher = 2.0 min/mcx

Figure 27 - Processus de production - coupe et marquage des lisses



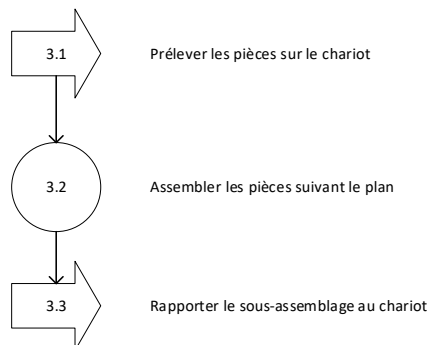
Processus à répéter pour chaque planche

Quantités et dimensions variables selon ouvertures et dimension du mur

Temps standard :

Comptabilisé avec la pose

Figure 28 - Processus de production - Coupe du revêtement



Processus pour un seul sous assemblage

Nombre variable selon nb ouvertures.

Linteaux et montants d'ouvertures seuls. Jamais de cadre complet.

1 poteau, coin ou joint par panneau

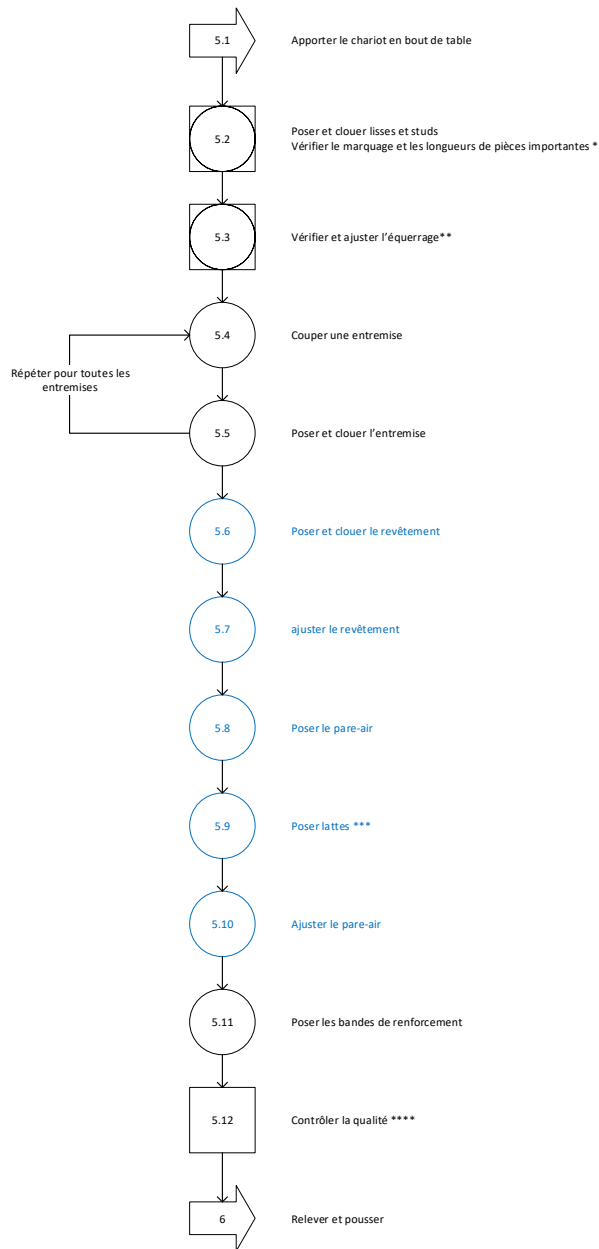
Temps standard :

Fenêtres & portes 10 min/ouverture (3 à 4 montants ou linteaux)

Poteaux 5 à 10 min/poteau (selon hauteur)

Coin ou joints 4 à 8 min/coin ou joint (selon hauteur)

Figure 29 - Processus de production - Pré-assemblage des ouvertures et montants



Processus pour un panneau de mur

* Pièces importantes (5.2) = 1 goujon minimum + Lisses + Empattement châssis des ouvertures.

** L'équerrage peut être fait après la pose des entremises.

*** Lattes : Type, position, nombre, etc.. Dépend du client.

**** Contrôle conformité plan + pose étiquettes de suivi. Peut aussi être fait au poste C.

Temps standard :

5.2 & 5.3 : 3 à 50 min/pl * coefficient de difficulté (selon hauteur et distance centre/centre)

5.4 & 5.5 : 1.2 min/mcx (écart rangées d'entremises : 48" centre/centre)

5.6 & 5.7 : 2 à 5 min/pl/rangée de 8'

5.8 & 5.10 : 0.1 à 0.2 min/pl/bande (selon matériau)

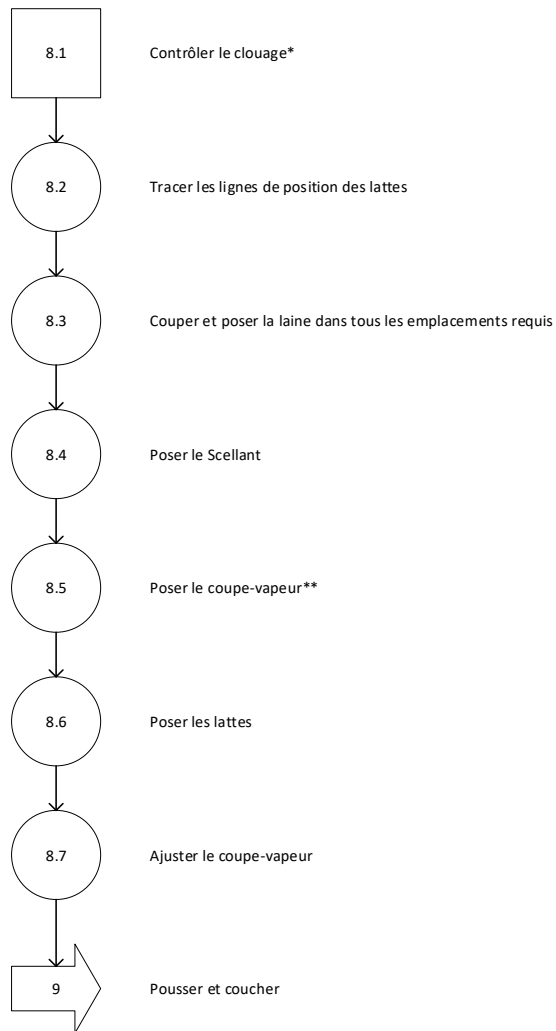
5.9 : 0.15 à 0.45 min/pl de latte (selon positionnement)

5.11 : 0.1 min

5.12 : Temps global (cf. 10 – inspection)

6 : 5 à 20 min/panneau (temps-Homme pour processus complet)

Figure 30 - Processus de production - Assemblage de la structure



Processus pour un panneau de mur

* Vérifier qu'aucun clou ne dépasse. Si nécessaire renfoncer ou enlever les clous mal positionnés.

** 95% polythène – 5% Flexotherme

Temps standards :

8.1 : 1 min

8.2 & 8.6 : 0.15 à 0.45 min/pl de lattes (selon positionnement)

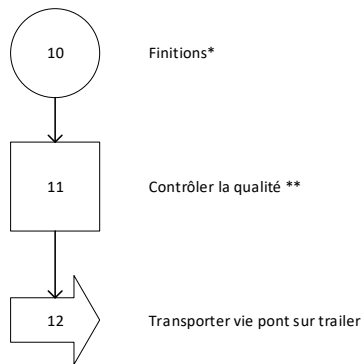
8.3 : 0.5 min/mcx/rangée 4'

8.4 : 0.1 min/pl

8.5 & 8.7 : 0.1 à 0.2 min/pl/bande (selon matériau)

9 : 5 à 20 min/panneau (temps-Homme pour processus complet)

Figure 31 - Processus de production - Isolation



Processus pour un panneau de mur

* Rare ! Effectué si difficulté à finir les tâches de l'isolation.

** Contrôle conformité plan + pose étiquette de suivi.

Temps standard :

10 : temps comptabilisé à la tâche 8 – Isolation

11 : Temps moyen de 5min pondéré par pieds linéaires ajustés.

12 : 10 min/panneau

Figure 32 - Processus de production – Inspection

A.2 Autres processus de production

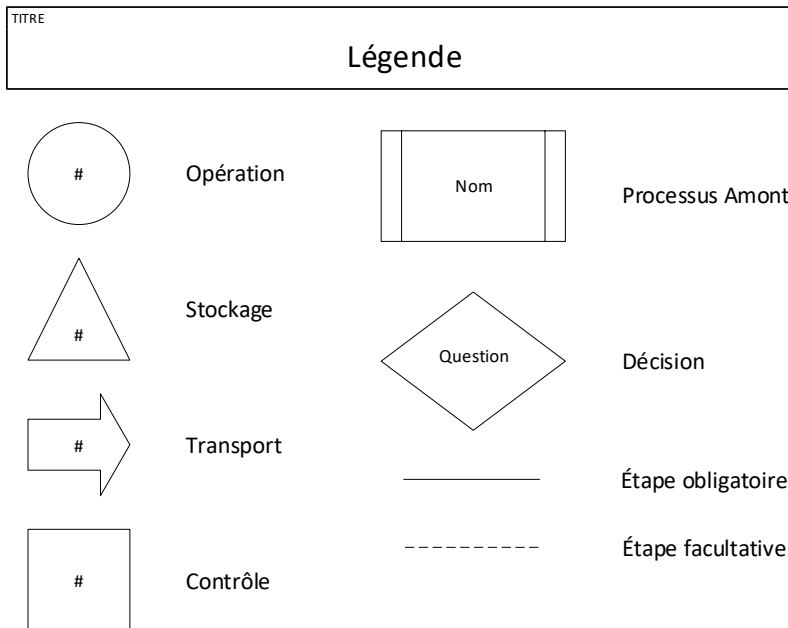


Figure 33 - Légende pour lecture des Graphiques d'analyse de processus de l'annexe A.2

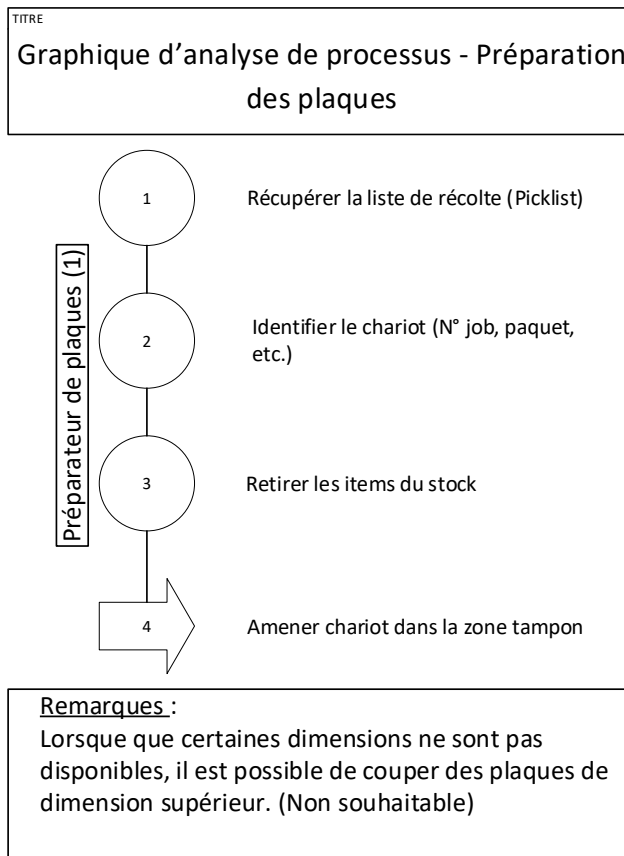


Figure 34 - Graphique d'analyse de processus - préparation des plaques

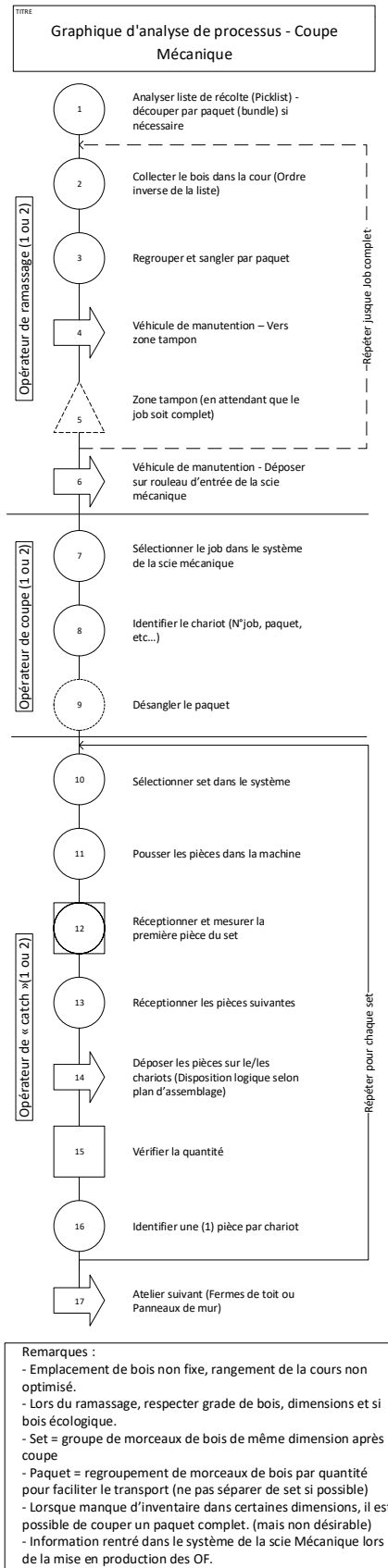
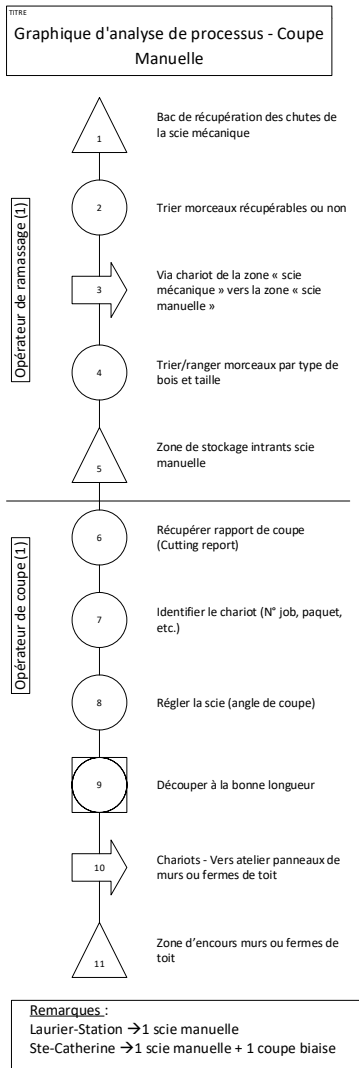
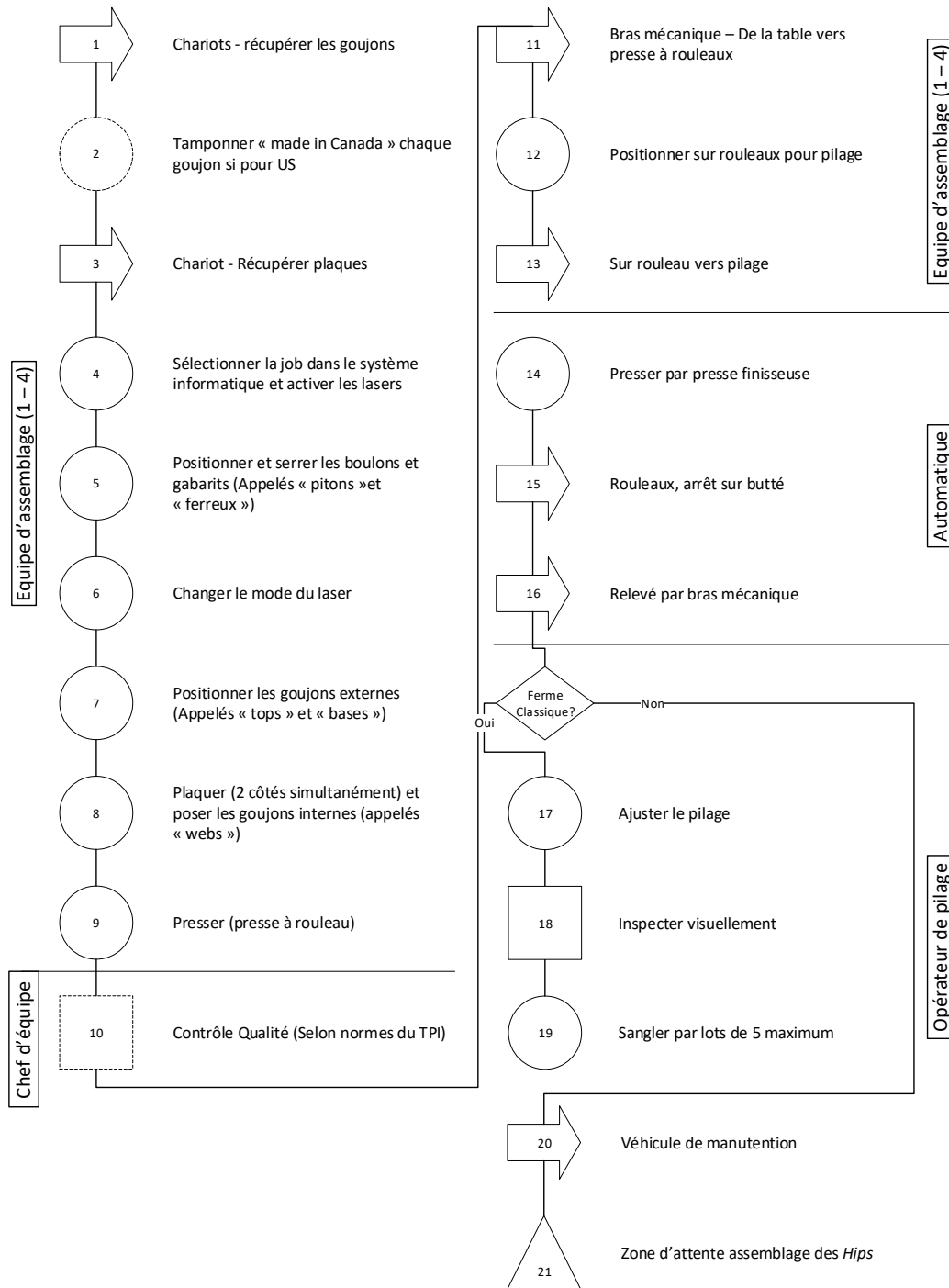


Figure 35 – Graphiques d'analyse de processus – Coupe manuelle & mécanique

TITRE

Graphique d'analyse de processus – Fermes de toit

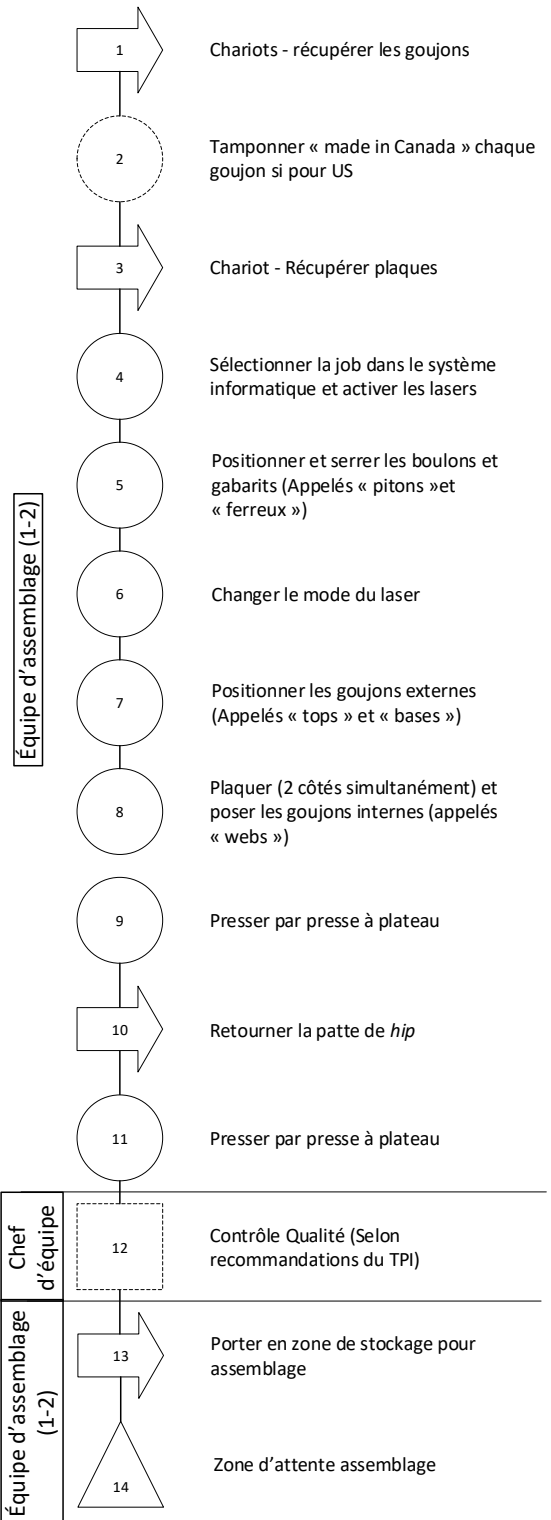


Remarques :

- Un (1) opérateurs d'assemblage pour 10 pieds à la base de la ferme de toit.
- Opérateur pilage : opérateur spécialisé, a travaillé sur table de montage auparavant.
- Processus identique pour les Noues.
- Fermes de toit non classiques = fermes pour *hips* ou fermes pour ferme maîtresse.
- Système informatique pour lasers mis à jour lors de la mise en production des OFs.

Figure 36 - Graphique d'analyse de processus pour assemblage des fermes de toit

TITRE
Graphique d'analyse de processus – Pattes de *hip*



TITRE
Graphique d'analyse de processus – Assemblage de *hip*

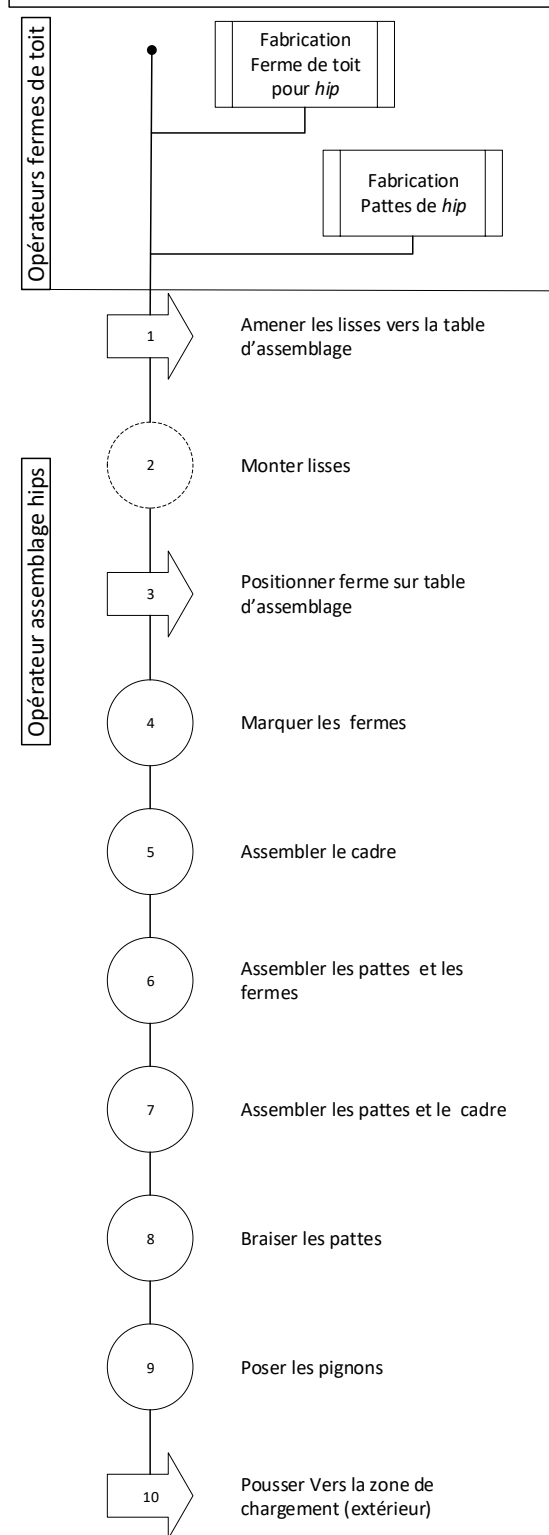
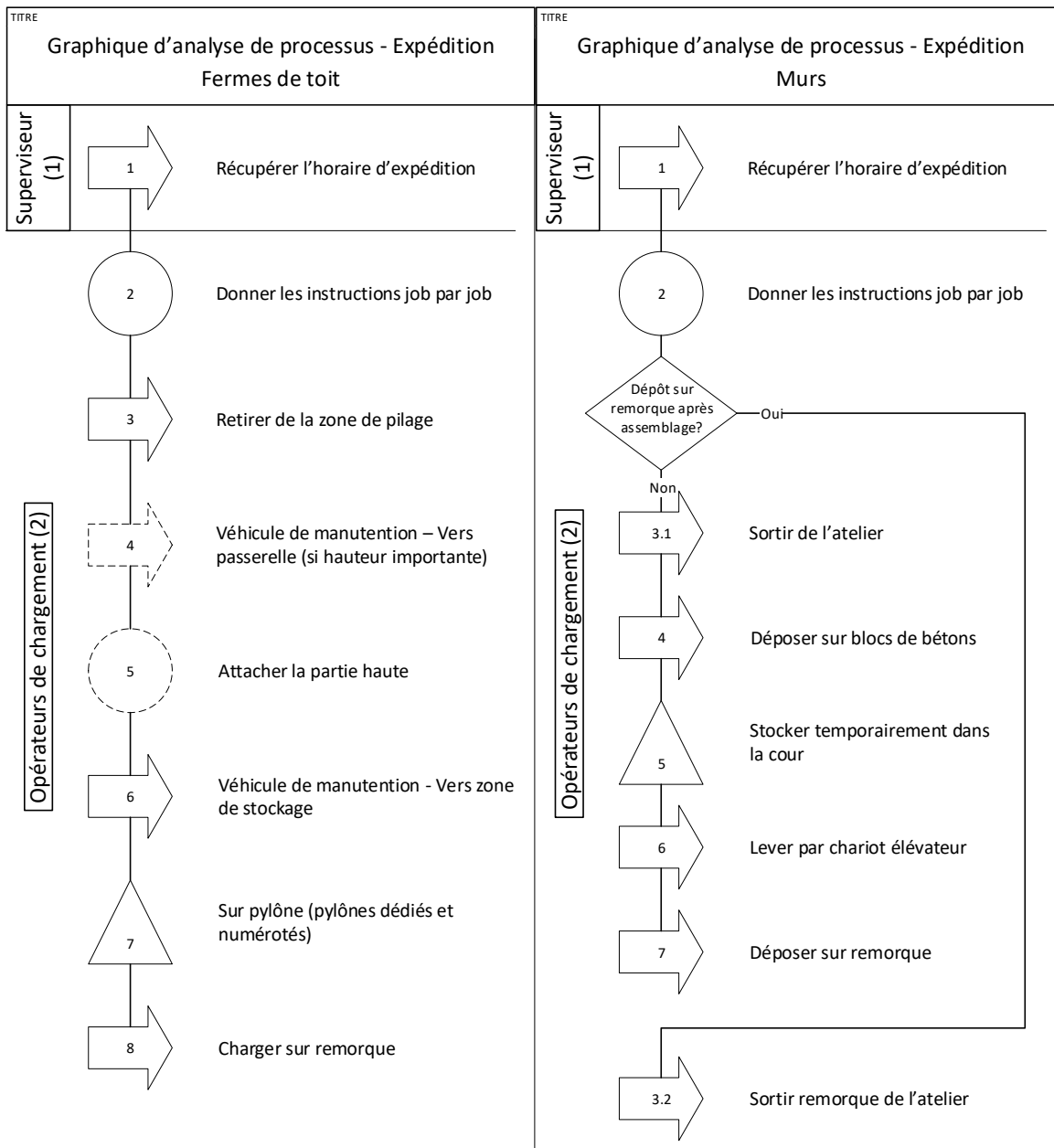


Figure 37 - Graphiques d'analyse de processus - Fabrication des pattes de *hip* & Assemblage des *hip*



Remarques :

- Les opérateurs de chargement ne sont pas affectés exclusivement à cette tâche (Ils se chargent aussi de la réception des matériaux et si nécessaire de l'approvisionnement usine)
- Pas de mandat particulier concernant la qualité.
- Opérateurs détenteurs de permis caristes
- le contenu des trailers avant livraison dépend grandement du job (quantité de produits) et des requêtes du client (livraison étalée ou globale, ...)

Particularités Fermes de toits :

- Processus identique pour les fermes de toit classiques, les noues, les hips, et les fermes maîtresses.
- Un job sera stocké en entier sur le même pylône. Par contre plusieurs jobs peuvent être stocké au même pylône.

Figure 38 – Graphiques d'analyse de processus – Expédition Panneaux de murs & Fermes de toit

B Taux d'occurrence Hauteur et Longueur

Tableau 41 - Distribution des Longueurs de panneau

Valeurs	Taux	Valeurs	Taux	Valeurs	Taux	Valeurs	Taux	Valeurs	Taux	Valeurs	Taux	Valeurs	Taux	Valeurs	Taux	Valeurs	Taux
1.00	1.97%	5.00	0.49%	9.00	1.48%	12.92	0.14%	16.67	0.02%	20.67	0.09%	24.67	0.06%	28.67	0.02%	34.00	0.09%
1.08	0.07%	5.08	0.36%	9.08	1.72%	12.93	0.01%	16.75	0.15%	20.75	0.06%	24.75	0.03%	28.75	0.03%	34.08	0.03%
1.17	1.06%	5.17	0.29%	9.17	0.22%	13.00	0.85%	16.92	0.07%	20.92	0.05%	24.92	0.05%	28.92	0.07%	34.17	0.01%
1.25	0.10%	5.25	0.18%	9.25	0.24%	13.08	0.08%	17.00	0.18%	21.00	0.17%	25.00	0.07%	29.00	0.11%	34.33	0.02%
1.33	1.26%	5.33	0.34%	9.33	0.60%	13.17	0.10%	17.08	0.02%	21.08	0.07%	25.08	0.01%	29.08	0.05%	34.42	0.01%
1.42	0.11%	5.42	0.18%	9.42	0.31%	13.25	0.11%	17.17	0.07%	21.17	0.07%	25.17	0.08%	29.17	0.15%	34.58	0.02%
1.50	0.36%	5.50	0.20%	9.50	0.76%	13.33	0.20%	17.25	0.05%	21.25	0.01%	25.25	0.03%	29.25	0.20%	35.00	0.05%
1.58	0.16%	5.58	0.20%	9.58	1.39%	13.42	0.14%	17.33	0.05%	21.33	0.02%	25.33	0.01%	29.33	0.47%	35.17	0.02%
1.67	0.16%	5.67	0.15%	9.67	0.69%	13.50	0.16%	17.42	0.05%	21.42	0.05%	25.34	0.01%	29.42	0.37%	35.25	0.03%
1.75	0.17%	5.75	0.30%	9.75	0.52%	13.58	0.11%	17.50	0.06%	21.50	0.09%	25.42	0.03%	29.50	0.02%	35.33	0.01%
1.92	0.23%	5.92	0.21%	9.92	0.53%	13.67	0.06%	17.58	0.10%	21.58	0.09%	25.50	0.02%	29.58	0.05%	35.50	0.02%
2.00	0.76%	6.00	1.20%	10.00	3.99%	13.75	0.39%	17.67	0.13%	21.67	0.01%	25.58	0.13%	29.67	0.02%	35.92	0.03%
2.08	0.16%	6.08	0.24%	10.08	0.59%	13.92	0.06%	17.75	0.11%	21.75	0.07%	25.67	0.02%	29.75	0.05%	36.00	0.05%
2.17	0.45%	6.17	0.33%	10.17	0.44%	14.00	0.31%	17.92	0.07%	21.92	0.02%	25.75	0.10%	29.92	0.06%	36.33	0.02%
2.25	0.20%	6.25	0.52%	10.25	0.22%	14.08	0.14%	18.00	0.20%	22.00	0.08%	26.00	0.05%	30.00	0.14%	36.42	0.01%
2.33	0.44%	6.33	0.26%	10.33	0.46%	14.17	0.17%	18.08	0.09%	22.08	0.10%	26.08	0.03%	30.08	0.01%	36.50	0.05%
2.42	1.35%	6.42	0.36%	10.42	0.24%	14.25	0.13%	18.17	0.08%	22.17	0.06%	26.17	0.01%	30.42	0.05%	36.75	0.02%
2.50	0.72%	6.50	0.75%	10.50	0.47%	14.33	0.15%	18.25	0.01%	22.25	0.01%	26.25	0.02%	30.50	0.03%	37.00	0.01%
2.58	0.46%	6.58	0.77%	10.58	0.28%	14.42	0.20%	18.33	0.02%	22.33	0.03%	26.33	0.02%	30.67	0.09%	37.17	0.02%
2.67	0.54%	6.67	0.26%	10.67	0.47%	14.50	0.14%	18.42	0.02%	22.42	0.22%	26.42	0.02%	30.75	0.01%	37.33	0.05%
2.75	0.30%	6.75	0.33%	10.75	0.87%	14.58	0.06%	18.50	0.10%	22.58	0.05%	26.50	0.02%	31.00	0.15%	37.42	0.01%
2.92	0.21%	6.92	0.11%	10.92	0.72%	14.67	0.39%	18.58	0.05%	22.67	0.15%	26.58	0.03%	31.08	0.02%	37.50	0.01%
3.00	3.07%	7.00	0.90%	11.00	0.83%	14.75	0.16%	18.67	0.05%	22.75	0.03%	26.67	0.02%	31.17	0.02%	37.92	0.01%
3.08	0.48%	7.08	0.70%	11.08	1.12%	14.92	0.05%	18.75	0.07%	22.92	0.01%	26.75	0.06%	31.25	0.01%	38.00	0.06%
3.17	0.11%	7.17	0.25%	11.17	0.20%	15.00	0.14%	18.92	0.06%	23.00	0.26%	26.92	0.09%	31.33	0.08%	38.08	0.01%
3.25	0.11%	7.25	0.43%	11.25	0.79%	15.08	0.09%	19.00	0.14%	23.08	0.09%	27.00	0.13%	31.42	0.01%	38.25	0.01%
3.33	0.05%	7.33	0.54%	11.33	1.01%	15.17	0.09%	19.08	0.01%	23.17	0.07%	27.17	0.02%	31.50	0.06%	38.33	0.01%
3.42	0.07%	7.42	0.87%	11.42	1.06%	15.25	0.10%	19.17	0.07%	23.25	0.13%	27.25	0.06%	31.58	0.03%	38.92	0.02%
3.50	0.29%	7.50	1.15%	11.50	0.69%	15.33	0.05%	19.25	0.10%	23.33	0.03%	27.33	0.06%	32.00	0.13%	39.00	0.02%
3.58	0.40%	7.58	0.45%	11.58	1.36%	15.42	0.09%	19.33	0.07%	23.42	0.11%	27.42	0.06%	32.08	0.03%	39.17	0.02%
3.67	0.37%	7.67	0.38%	11.67	0.74%	15.50	0.18%	19.42	0.07%	23.50	0.10%	27.50	0.03%	32.17	0.03%	39.25	0.01%
3.75	0.17%	7.75	0.31%	11.75	0.33%	15.58	0.10%	19.50	0.07%	23.58	0.47%	27.58	0.09%	32.25	0.02%	39.33	0.01%
3.92	0.22%	7.92	0.30%	11.92	0.67%	15.67	0.06%	19.58	0.09%	23.67	0.09%	27.67	0.01%	32.50	0.03%	39.42	0.01%
4.00	1.54%	8.00	3.46%	12.00	5.15%	15.75	0.03%	19.67	0.09%	23.75	0.08%	27.75	0.03%	32.58	0.05%	39.58	0.01%
4.08	0.43%	8.08	0.36%	12.08	0.09%	15.92	0.01%	19.75	0.07%	23.92	0.06%	27.92	0.01%	32.92	0.08%	39.67	0.01%
4.17	0.08%	8.17	0.26%	12.17	0.23%	16.00	0.24%	19.92	0.08%	24.00	0.48%	28.00	0.11%	33.00	0.13%	39.92	0.02%
4.25	0.63%	8.25	0.49%	12.25	0.48%	16.08	0.03%	20.00	0.26%	24.08	0.02%	28.08	0.01%	33.25	0.03%	40.00	0.03%
4.33	0.10%	8.33	0.29%	12.33	0.54%	16.17	0.07%	20.08	0.03%	24.17	0.02%	28.17	0.10%	33.33	0.01%	40.33	0.01%
4.42	0.29%	8.42	0.43%	12.42	0.54%	16.25	0.07%	20.17	0.01%	24.25	0.06%	28.25	0.08%	33.42	0.03%	40.50	0.01%
4.50	3.01%	8.50	1.28%	12.50	0.09%	16.33	0.06%	20.33	0.02%	24.33	0.02%	28.33	0.29%	33.50	0.02%	40.58	0.01%
4.58	0.74%	8.58	0.47%	12.58	0.14%	16.42	0.08%	20.42	0.02%	24.42	0.09%	28.42	0.07%	33.58	0.06%	42.00	0.01%
4.67	0.10%	8.67	0.80%	12.67	0.10%	16.50	0.05%	20.50	0.03%	24.50	0.07%	28.50	0.13%	33.67	0.01%	42.50	0.01%
4.75	0.13%	8.75	0.30%	12.75	0.20%	16.58	0.05%	20.58	0.05%	24.58	0.14%	28.58	0.08%	33.92	0.01%	42.67	0.01%
4.92	0.26%	8.92	0.48%														

Tableau 42 - Distribution des hauteurs de panneau

Valeur	Taux	Valeur	Taux	Valeur	Taux	Valeur	Taux	Valeur	Taux	Valeur	Taux	Valeur	Taux	Valeur	Taux	Valeur	Taux
1.00	0.40%	3.58	0.01%	6.00	0.06%	8.17	5.57%	9.75	0.67%	11.50	0.32%	13.17	0.06%	15.42	0.01%	18.25	0.01%
1.08	0.02%	3.67	0.03%	6.17	0.02%	8.25	1.01%	9.92	2.75%	11.58	0.08%	13.25	0.10%	15.50	0.01%	18.33	0.69%
1.17	0.02%	3.75	0.02%	6.25	0.01%	8.33	3.21%	10.00	0.80%	11.67	0.07%	13.33	0.06%	15.92	0.16%	18.42	0.03%
1.42	0.01%	3.92	0.01%	6.42	0.02%	8.42	5.77%	10.08	0.18%	11.75	0.07%	13.42	0.01%	16.00	0.20%	19.00	0.01%
1.75	0.03%	4.00	0.02%	6.50	0.01%	8.50	0.01%	10.17	0.20%	11.92	0.03%	13.50	0.03%	16.17	0.26%	19.42	0.02%
1.92	0.01%	4.17	0.01%	6.58	0.03%	8.58	0.13%	10.25	0.31%	12.00	1.52%	13.92	0.29%	16.50	0.01%	19.58	0.02%
2.00	0.21%	4.25	0.02%	6.75	0.02%	8.67	0.56%	10.33	0.25%	12.08	0.22%	14.00	0.07%	16.75	0.01%	19.75	0.02%
2.08	0.01%	4.33	0.09%	6.92	0.10%	8.75	0.39%	10.42	5.09%	12.17	0.20%	14.08	0.03%	16.92	0.02%	20.00	0.01%
2.17	0.02%	4.42	0.06%	7.08	0.03%	8.92	7.83%	10.50	10.99%	12.25	0.10%	14.25	0.01%	17.00	0.30%	20.17	0.01%
2.25	0.02%	4.50	0.07%	7.25	0.01%	9.00	24.36%	10.58	0.43%	12.33	0.49%	14.33	0.03%	17.25	0.01%	20.42	0.02%
2.42	0.16%	4.67	0.03%	7.33	0.05%	9.08	0.10%	10.67	1.86%	12.42	0.25%	14.42	0.07%	17.33	0.02%	20.50	0.01%
2.50	0.03%	4.75	0.02%	7.50	0.06%	9.17	5.48%	10.75	0.63%	12.50	0.13%	14.50	0.02%	17.42	0.01%	20.58	0.01%
2.67	0.02%	4.92	0.01%	7.58	0.06%	9.25	1.40%	10.92	0.09%	12.58	0.07%	14.58	0.03%	17.50	0.06%	21.25	0.01%
3.00	0.18%	5.00	0.08%	7.67	0.01%	9.33	1.20%	11.00	0.14%	12.67	0.08%	14.67	0.03%	17.58	0.05%	21.58	0.06%
3.17	0.16%	5.33	0.26%	7.75	0.07%	9.42	0.85%	11.08	0.06%	12.75	0.05%	15.00	0.06%	17.67	0.01%	22.25	0.01%
3.25	0.08%	5.42	0.01%	7.92	0.32%	9.50	0.13%	11.17	0.01%	12.92	0.09%	15.17	0.06%	17.75	0.02%	23.00	0.01%
3.33	0.02%	5.58	0.03%	8.00	0.47%	9.58	0.52%	11.33	4.21%	13.00	0.13%	15.25	0.23%	18.00	0.09%	23.75	0.01%
3.50	0.01%	5.75	0.01%	8.08	0.16%	9.67	0.15%	11.42	1.41%	13.08	0.07%						

C Temps d'opération pour le processus de production des panneaux de murs

Tableau 43 - Temps d'opération pour le processus de production des panneaux de murs

Server	intitulé référence	référence	Hypothèses	Variation selon type mur	Temps implémenté	
Coupe Lisses	Bandes de plancher	2,0min/mcx	2 pour 20p.l. de longueur		$\text{Math.If}(\text{ModelEntity.Longueur} \leq 20, 2*2, \text{ModelEntity.Longueur} > 40, 6*2, 4*2)$	
Coupe Revêtement	Carton goudronné Ou naturel	1,5 min/p.l. /rangée 8'	Référence = temps global => 20% alloué pour coupe, 80% pour pose Ouvertures déjà prises en compte Carton 5%, OSB 75%, isolant RX 5%, isolant rigide 5%, gylap 10%	0 si type 0	$\text{Random.Discrete}(1.5, 0.05, 2, 0.8, 2.5, 0.85, 3, 0.9, 5, 1) * \text{ModelEntity.Longueur} * 0.2 * (\text{Math.Floor}(\text{ModelEntity.hauteur} / 8) + 1)$	
	OSB ou contreplaqué	2 min/p.l. /rangée 8'				
	Panneau isolant RX	2,5 min/p.l. /rangée 8'				
	Panneaux isolant rigide	3min/p.l. /rangée 8'				
Gylap	5 min/p.l. /rangée 8'					
Pré-Assemblage	fenêtres & portes	10 min/ouverture	1 par panneau		10	
	OU poteaux coins ou joints	5; 7; 10 min/poteau (<8' ; <12' ; >=12') 4; 6; 8 min/poteau (<8' ; <12' ; >=12')	1 / panneau - 50% poteau/50% coins-joints /!\ Temps selon hauteur		+ $\text{Random.discrete}(\text{Math.If}(\text{ModelEntity.Hauteur} < 8, 5, \text{ModelEntity.Hauteur} \geq 12, 10, 7), 0.5, \text{Math.If}(\text{ModelEntity.Hauteur} < 8, 4, \text{ModelEntity.Hauteur} \geq 12, 8, 6), 1)$	
Assemblage	Set up	1 min	Ajustement table		1 min	
	OU	Structure 24" c/c	3; 4; 6; 12; 20 min/p.l. * cplxte (<=4,33'; 8,33'; 12,5'; 16,5'; >16,5')	Moyenne de 20" c/c Temps de référence - Coupe lisses - coupe revêtement (Car temps de référence assemblage inclus coupe lisses et assemblage, mais en réalité poste déjà comptabilisé) (Mais /!\ >=0) 2 opérateurs présent en moyenne => temps /2	Si type 0 : *0.8	$\text{Math.Max}(\text{Math.If}(\text{ModelEntity.Distance_cc} == 24, \text{Math.If}(\text{ModelEntity.Hauteur} \leq 4.33, 3, \text{ModelEntity.Hauteur} \leq 8.33, 4, \text{ModelEntity.Hauteur} \leq 12.5, 6, \text{ModelEntity.Hauteur} \leq 16.5, 12, 20), \text{ModelEntity.Distance_cc} == 16, \text{Math.If}(\text{ModelEntity.Hauteur} \leq 4.33, 3.75, \text{ModelEntity.Hauteur} \leq 8.33, 5, \text{ModelEntity.Hauteur} \leq 12.5, 7.5, \text{ModelEntity.Hauteur} \leq 16.5, 15, 25), \text{ModelEntity.Distance_cc} == 12, \text{Math.If}(\text{ModelEntity.Hauteur} \leq 4.33, 5.25, \text{ModelEntity.Hauteur} \leq 8.33, 7, \text{ModelEntity.Hauteur} \leq 12.5, 10.5, \text{ModelEntity.Hauteur} \leq 16.5, 21, 35), \text{Math.If}(\text{ModelEntity.Hauteur} \leq 4.33, 7.5, \text{ModelEntity.Hauteur} \leq 8.33, 10, \text{ModelEntity.Hauteur} \leq 12.5, 15, \text{ModelEntity.Hauteur} \leq 16.5, 30, 50)) * \text{ModelEntity.Complexite} * \text{ModelEntity.Longueur} - \text{ModelEntity.PTCoupeLisses} - \text{ModelEntity.PTCoupeRev})$
		Structure 16" c/c	3,75; 5; 7,5; 15; 25 min/p.l. * cplxte (<=4,33'; 8,33'; 12,5'; 16,5'; >16,5')			
		Structure 12" c/c	5,25; 7; 10,5; 21; 35 min/p.l. * cplxte (<=4,33'; 8,33'; 12,5'; 16,5'; >16,5')			
		Structure 8" c/c	7,5; 10; 15; 30; 50 min/p.l. * cplxte (<=4,33'; 8,33'; 12,5'; 16,5'; >16,5')			
	Entremises	1 min/mcx	Distance c/c 48" sur hauteur Pas d'ouverture prise en compte Coupe = 50% - Pose = 50%		+ $\text{Math.Floor}(\text{ModelEntity.Hauteur}/4) * \text{ModelEntity.longueur}/(\text{ModelEntity.distance_cc}/12)$	
	revêtement	cf rev.	cf rev.		+ 4 * PTCoupeRev	
	pare-air	0,1 min/pl			+ 0.1 * ModelEntity.longueur	
	Latte	0,15; 0,2; 0,45 min/pl/latte	80% de Longueur ou Hauteur distance c/c de 16" entre lattes, 40% horizontales, 40% verticales, 20% diagonales		+ $\text{Random.discrete}(\text{Math.Floor}(\text{ModelEntity.Hauteur}/1.33) * 0.8 * \text{ModelEntity.Longueur} * 0.2, 0.4, \text{Math.Floor}(\text{ModelEntity.Longueur}/1.33) * 0.8 * \text{ModelEntity.Hauteur} * 0.15, 0.8, 0.8 * \text{Math.sqrt}(\text{ModelEntity.Hauteur} + \text{ModelEntity.Longueur}) * 0.45, 1)$	
	Bande renforcement	1 min	Sur 80% des panneaux de murs 2 opérateurs présent en moyenne => temps /2		+ $\text{Random.Discrete}(1, 0.8, 0, 1)$	
Déplacement	5; 10; 20 min (<= 3'; <=12'; > 12') /!\ Tps homme total	2 déplacement. 2 opérateurs après assemblage, 1 après isolation => Temps homme/3		$\text{Math.If}(\text{ModelEntity.PLA} \leq 3, 5, \text{ModelEntity.PLA} > 12, 20, 10)/3$		
Isolation	Set up		Hors Inspection		1 min	
	Latte	0,15; 0,2; 0,45 min/p.l./latte	80% de Longueur ou Hauteur distance c/c de 16" entre lattes, 40% horizontales, 40% verticales, 20% diagonales	0 si type 0 ou 1	+ $\text{Random.discrete}(\text{Math.Floor}(\text{ModelEntity.Hauteur}/1.33) * 0.8 * \text{ModelEntity.Longueur} * 0.2, 0.4, \text{Math.Floor}(\text{ModelEntity.Longueur}/1.33) * 0.8 * \text{ModelEntity.Hauteur} * 0.15, 0.8, 0.8 * \text{Math.sqrt}(\text{ModelEntity.Hauteur} + \text{ModelEntity.Longueur}) * 0.45, 1)$	
	Laine de fibre de verre	0,5 min/mcx/rangée 4'	Pas d'ouverture prise en compte		+ $\text{ModelEntity.longueur} * (\text{Math.Floor}(\text{ModelEntity.Hauteur}/4) + 1) * 0.5 / (\text{ModelEntity.distance_cc}/12)$	
	Scellant	0.1 min/p.l.			+ 0.1 * ModelEntity.Longueur	
	OU	Coupe-vapeur Polythène	0,1 min/p.l. /bande	95% polythène, 5% Flexotherm	+ $\text{Random.Discrete}(0.1, 0.95, 0.2, 1) * \text{ModelEntity.longueur}$	
	Coupe-vapeur Flexotherm	0,2 min/p.l. /bande				
Déplacement	5; 10; 20 min (<= 3'; <=12'; > 12') /!\ Tps homme total	2 déplacement. 2 opérateurs après assemblage, 1 après isolation => Temps homme/3		$\text{Math.If}(\text{ModelEntity.PLA} \leq 3, 5, \text{ModelEntity.PLA} > 12, 20, 10)/3$		
Inspection	Inspection	5 min en moyenne par panneau de mur - indexé sur les PLA	Moyenne de PLA/ panneau de mur : 14.657 Pondération par PLA	coefficient selon type	$\text{ModelEntity.Longueur} * \text{ModelEntity.Complexite} * \text{Math.If}(\text{ModelEntity.Hauteur} \geq 14.167, 2.2, \text{ModelEntity.Hauteur} \leq 10.167, 1, 1.4) * \text{Math.If}(\text{ModelEntity.TypeMur} == 0, 0.8, \text{ModelEntity.TypeMur} == 1, 1, \text{ModelEntity.TypeMur} == 11, 1.4, 1.65) * 5 / 14.657$	
Chargement	Chargement	7,5; 15; 30 min (<=3'; <=12'; >12')	Temps réel 10 min pour tout panneau de mur		10 min	

D Processus de fabrication d'éléments préfabriqués : état de l'art et analyse d'un cas d'études

Ici est inséré l'article intitulé « Processus de fabrication d'éléments préfabriqués : état de l'art et analyse d'un cas d'études ». Il a été présenté en juin 2018 à la conférence « 12e Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation - MOSIM'18 ». La version ici présente est identique à celle publiée.

D.1 Résumé

La construction industrialisée est actuellement en plein essor au Québec et ailleurs dans le monde. Le secteur étant toutefois fortement fragmenté, beaucoup de petits producteurs font face à un manque de capacité et ont des processus de gestion de la production peu développés. Cette étude s'intéresse aux façons d'améliorer les processus de production dans ce domaine pour gagner en efficacité. Une revue de la littérature permet tout d'abord de faire un état des lieux de la planification et de la gestion de la production dans la construction industrialisée. Elle compare ce secteur à la construction traditionnelle et au secteur manufacturier puis recense les différents problèmes auxquels les entreprises peuvent faire face ainsi que leurs solutions si elles sont connues. Une étude de cas concernant une entreprise québécoise spécialisée dans la production d'éléments préfabriqués montre par la suite les améliorations qui pourraient être effectuées afin de diminuer les temps d'opération et mieux utiliser la capacité de production tout en respectant des contraintes de financement et de disponibilité de la main d'œuvre.

D.2 Introduction

La demande en logements demeure une réalité et ne semble pas vouloir décroître aux cours des prochaines années puisque « le logement constitue l'une des composantes les plus cycliques de la demande globale » (Egebo *et al.*, 1990). Peu importe le pays, la zone géographique ou le niveau économique considéré, le logement est un droit et une nécessité pour tous. L'industrie du logement a cependant encore aujourd'hui des difficultés à subvenir convenablement à une telle demande. En effet, c'est un secteur d'activité très fragmenté qui utilise des méthodes ne s'avérant pas toujours des plus efficaces. C'est pourquoi l'industrie de la construction est aujourd'hui en cours de transformation. De plus en plus, les techniques de construction traditionnelles sont abandonnées ou révisées au profit de méthodes modernes de construction (Modern Methods of Construction – MMC) . La House Builders Federation au Royaume-Uni définit les MMC comme « des méthodes qui fournissent un processus de gestion des produits efficace pour fournir plus de produits de meilleure qualité en moins de temps » (Traduit de Sarden et Engstrom, 2010). Ces méthodes comprennent en grande majorité la « construction industrialisée » (Industrialized Housing - IH) qui est définie comme « la branche de la construction qui est partiellement ou totalement réalisée dans un environnement contrôlé (i.e. une usine) utilisant des processus et des machines industrielles (Traduit de Branson *et al.*, 1990). Les MMC ne se déroulent pas forcément hors-site. Cependant, celles qui nous intéressent ici le sont. C'est pourquoi par la suite, nous ne parlerons implicitement que des MMC hors-site. Ces pratiques, plus connues sous le nom de préfabrication, peuvent être en grande partie apparentées à celles d'autres secteurs industriels tels que le secteur manufacturier. Le principe est de réduire les gaspillages et de faire des économies tout en augmentant les capacités de production. Par ailleurs, le contexte environnemental actuel pousse les producteurs à chercher des techniques et des matériaux durables. En effet, en plus d'être plus économique, cela peut être un avantage majeur face à la concurrence puisque la clientèle se tourne, elle aussi, vers les solutions dites "vertes" ou du moins durables. Il est donc intéressant de noter que ces nouvelles méthodes permettent à l'industrie de la construction, reconnue comme étant très polluante, de faire un pas vers le développement durable.

Comme expliqué précédemment, le secteur de la construction manque encore d'efficacité pour répondre à la demande. Même si les MMC permettent de meilleures performances,

l'IH fait encore face à de nombreux problèmes. Dans cette étude, il sera donc question de caractériser ces problèmes et de proposer des solutions ad hoc. D'abord, ce papier a pour objectif de répondre aux questions suivantes :

- Quelle valeur présente les MMC face à la construction traditionnelle et dans quelle mesure les MMC peuvent s'apparenter au secteur manufacturier ?
- Quels sont les problèmes majeurs que l'on peut rencontrer dans les processus de production du secteur de l'IH et comment peut-on les solutionner ?

L'article vise par ailleurs à mieux comprendre comment appliquer les bonnes pratiques dans le monde réel.

Pour répondre à ces objectifs, la recherche a d'abord nécessité la réalisation d'une revue systématique de la littérature afin de relever les différents problèmes rencontrés dans le secteur de la construction industrialisée et leurs éventuelles solutions. La revue a ensuite été suivie de l'analyse d'un cas réel d'entreprise, œuvrant dans le secteur de la fabrication d'éléments préfabriqués au Québec. Une telle analyse a permis de mettre en lumière des problèmes majeurs rencontrés par le joueur industriel. Notamment, certains auteurs ont souligné que la transformation du secteur de la construction s'accompagne d'une transformation du besoin en main-d'œuvre. En effet, pour l'IH, les opérateurs peuvent être moins nombreux et posséder un portfolio de compétences moins exhaustif. L'étude de cas a quant à elle montré que le problème du manque de main-d'œuvre s'avère une dure réalité qui ne cesse de prendre de l'ampleur. Ce papier contribue donc à mieux faire connaître les différentes difficultés auxquelles peuvent faire face les entreprises de l'industrie du préfabriqué. Il permet également d'exposer un processus réel de production particulier, d'en relever les principaux problèmes et d'y proposer des solutions adéquates.

Ce papier est divisé de la façon suivante : La revue de la littérature conduite durant le projet est tout d'abord explicitée. L'étude de cas menée est par la suite introduite. L'article se termine par une brève conclusion.

D.3 Revue de la littérature : Méthodologie

Comme l'explique (Tranfield *et al.*, 2003), une revue de littérature classique est souvent critiquée dans le monde scientifique. En effet, son manque de rigueur et la subjectivité du ou des chercheurs qui la mènent sont souvent pointés du doigt puisqu'il peut s'agir d'une source de biais non négligeable. Une revue systématique de la littérature apporte une solution à ce problème puisque c'est un processus défini comme reproductible, scientifique et transparent. Cette section propose donc une revue systématique de la littérature portant sur la gestion de la production dans le secteur de la construction industrialisée. Les trois principales étapes suivies sont explicitées dans les prochains paragraphes.

D.3.1 Planifier la revue

Le but de cette étape est de bien définir le sujet. Il faut donc poser la problématique avec une ou plusieurs questions de recherche. Il faut aussi définir une stratégie de recherche basée sur des critères d'inclusion et d'exclusion. Dans le cas présent, le sujet a été restreint aux avantages/inconvénients des activités dites hors-site ainsi qu'à la gestion de la production de la construction préfabriquée. Ainsi les études liées davantage au génie civil ont été écartées. Quatre questions de recherche ont ensuite été définies :

Q1 : Quelle valeur présente les méthodes modernes de construction face à la construction traditionnelle ?

Q2 : Quels sont les points de différenciation entre le secteur de l'IH et le secteur manufacturier ?

Q3 : Quels sont les problèmes majeurs que rencontre l'industrie du préfabriqué ? Et s'il y a lieu, quelles sont les solutions proposées ?

Q4 : Quels outils et équipements sont ou peuvent être mis en place pour supporter la production de structures préfabriquées ?

Le choix des articles via les mots clés et l'analyse des papiers obtenus après tri ont permis de faire la lumière sur ces questions.

D.3.2 Conduire la revue

Il s'agit à présent de trouver des mots clés et des termes de recherche en adéquation avec la problématique et la stratégie de recherche définies lors de l'étape précédente. Ainsi doivent ressortir uniquement les études correspondant aux critères inclusifs et n'étant pas concernées par les critères exclusifs. Ces études doivent pouvoir aider à trouver une réponse aux questions de la problématique.

En procédant par essais, de nombreux mots clés et combinaisons de mots clés ont été testés dans des bases de données spécifiques au génie industriel. Plus particulièrement, les recherches ont été faites via le moteur de recherche *Engineering Village* avec les bases de données *Compendex* et *Inspec*, puis via la base de données *Web of Science*. Ces mots clés ont été cherchés dans le titre, le résumé ou le sujet référencé de chaque étude. La littérature scientifique consultée étant principalement écrite en anglais, il fut donc nécessaire d'utiliser des mots clés en anglais. Les termes de recherche retenus sont résumés dans le tableau 1. Chaque ensemble de termes de recherche (un par ligne du tableau 1) est concaténé par l'opérateur logique « ET ». D'autres mots clés ont été testés puis retirés, puisqu'ils ne permettaient pas de cibler assez les articles intéressants et/ou d'éliminer les articles hors sujet. Les recherches ont débuté au 1er mai 2017. Afin de poursuivre les recherches basées sur une banque d'articles précis et des informations déterminées, il a fallu définir une date de fin des recherches. Cette date a été fixée au 5 septembre 2017. Tous les articles de la revue de littérature font donc partie des résultats lorsque les mots clés ont été soumis à la base de données entre ces deux dates.

Mots clés	Thème ciblé
"Modern Methods of Construction" OU "Industrialized Housing" OU "Modular Building Systems"	Construction préfabriquée
Manufactur* OU Production	Production

Process* OU (Factory OU Factories OU Facility OU Facilities OU Shop-Floor* OU Work-Floor* OU Plant*)	Études centrées sur le processus ou les opérations hors-site/en usine
Manag* OU Control*	Gestion des opérations

Tableau 1 - Tableau récapitulatif des termes de recherche

Ainsi lorsque la série de termes de recherche a été soumise à *Engineering village*, 23 articles différents (28 avant retrait des doublons) sont ressortis. Sur la base des résumés (et des introductions et conclusions en cas de doute), les articles ont été filtrés. Tout article hors sujet a été retiré de la liste. Les articles traitant de design ou les articles dans une langue autre que l'anglais ou le français n'ont pas été traités. Il en résulte la série de 13 articles présentée dans le Tableau 2. La même série de termes de recherche a été soumise à la base de données *Web of Science*. Par souci de cohérence, la recherche a été limitée aux index *Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)*, *Conference Proceedings Citation Index- Science (CPCI-S)* et *Emerging Sources Citation Index (ESCI)*, les autres index étant consacrés aux sciences humaines et sociales. En suivant le même filtrage que celui décrit précédemment, seul 2 articles ont été retenus. Il s'agit d'articles déjà obtenus via Engineering Village.

Référence	Titre
(Hook et Stehn, 2008)	<i>Applicability of lean principles and practices in industrialized housing production</i>
(Branson <i>et al.</i> , 1990)	<i>Automation technologies for the industrialized housing manufacturing industry</i>
(Broadway et Mullens, 2004)	<i>Shop-floor information systems for industrialized housing production</i>

(Kozlovska et Spiakova, 2011)	<i>Modern methods of construction vs. construction waste</i>
(Sarden et Engstrom, 2010)	<i>Modern methods of construction: A solution for an industry characterized by uncertainty?</i>
(Hairstans, 2010)	<i>Timber offsite Modern Methods of Construction</i>
(Johnsson et Meiling, 2009)	<i>Defects in offsite construction: Timber module prefabrication</i>
(Pan et al., 2008)	<i>Leading UK housebuilders' utilization of offsite construction methods</i>
(Bildsten et al., 2010)	<i>Applying the kraljic model to the construction sector: The case of a prefab housing factory</i>
(Noguchi, 2005)	<i>Japanese manufacturers' 'cost-performance' marketing strategy for the delivery of solar photovoltaic homes</i>
(Taylor et al., 2009)	<i>A comparison of modern methods of bathroom construction: A project case study</i>
(Nahmens et Bindroo, 2011)	<i>Is customization fruitful in industrialized homebuilding industry?</i>
(Tennant et al., 2012)	<i>Re-engineering the construction supply chain : Transferring on-site activity, offsite</i>

Tableau 2 - Liste des articles retenus pour la revue

D.4 Analyse descriptive des résultats

Afin d'avoir une meilleure compréhension des études de cette revue, il est important de savoir d'où elles proviennent et à quelle période elles ont été réalisées. Les paramètres géographiques permettent d'identifier les pôles de compétence et où se situent les besoins. En effet, les études répondent souvent à des besoins réels d'un pays ou d'une région

donnée tout en s'appuyant sur des données concrètes récoltées sur le terrain. Il faut donc un secteur au minimum naissant pour avoir des données fiables. On observe sur la figure 1 que l'ensemble des études proviennent de pays riches de la triade, soit des pays ayant une économie fortement développée. La forte demande en logements présente dans les pays industrialisés couplée avec les normes sanitaires et de sécurité élevées engendre un besoin de logements de qualité en grande quantité. Il est donc logique que ce soit des pays industrialisés qui cherchent à augmenter leur efficacité dans le secteur de la construction pour ainsi créer plus de logements en adéquation avec la demande. L'année de publication d'un papier donne une bonne indication sur la période à laquelle l'étude a été réalisée. Il est intéressant de constater ici (cf. figure 1) que la plupart des études ont été menées au cours des dix dernières années. Nous pouvons donc en déduire qu'il s'agit d'un domaine de recherche récent, ce qui peut expliquer le manque d'abondance d'études couvrant la discipline. Toutefois, leur répartition dans le temps n'est pas homogène. Cela peut s'expliquer par le caractère très appliqué du domaine. En effet, les entreprises mettent en place des actions pour évoluer, mais de telles mesures ne sont pas toujours publiées dans la littérature scientifique ni même professionnelle.

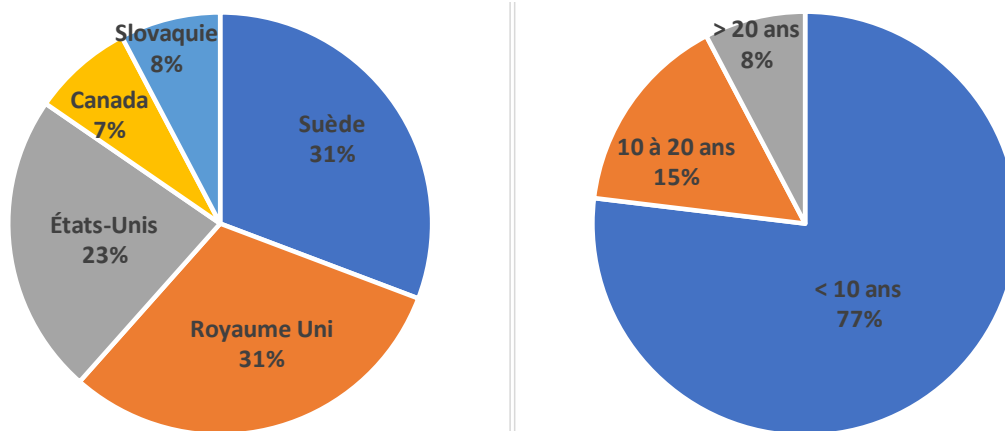


Figure 1 – Répartition des articles de la revue selon leur provenance et selon leur année de publication

D.5 Revue de la littérature : Analyse thématique

Dans cette partie, il sera question d'utiliser les articles trouvés pour répondre aux questions de recherche.

D.5.1 Quelle valeur présente les méthodes modernes de construction face à la construction traditionnelle ?

Quasiment tous les articles explorés donnent des éléments de réponse à cette question. Comme montré dans l'analyse descriptive ci-dessus, les Méthodes Modernes de Construction (MMC) dont fait partie la construction industrialisée (IH – Industrialized Housing), constituent un sujet de recherche assez récent. Il est donc encore utile de démontrer l'intérêt que cela peut représenter pour les différentes parties prenantes. Certaines recherches (e.g., (Kozlovska et Spiakova, 2011)) sont même axées directement sur cet intérêt.

Tout d'abord, l'avancée majeure que permettent les MMC est la possibilité de standardiser une partie plus ou moins importante de la construction. D'un point de vue plus général, réaliser une partie des activités hors-site permet d'implanter un flot de production et de passer ainsi d'un fonctionnement en mode projet vers un fonctionnement en mode processus (Hairstans, 2010). (Sarden et Engstrom, 2010) d'ajouter que des processus bien définis permettent une coordination plus rationnelle et plus efficace entre les étapes de construction et entre les parties prenantes. (Branson *et al.*, 1990) soulignaient déjà une caractéristique importante pour permettre la standardisation, notamment via la technologie, soit la répétitivité des processus de production ramenés hors-site. La standardisation a de nombreux avantages. De manière générale, elle permet un meilleur contrôle de la production (Nahmens et Bindroo, 2011; Sarden et Engstrom, 2010), une plus grande prédictibilité (Pan *et al.*, 2008; Sarden et Engstrom, 2010) et un gain en temps (Kozlovska et Spiakova, 2011; Pan *et al.*, 2008; Sarden et Engstrom, 2010). Enfin le fonctionnement par processus apporte un avantage majeur puisque cela concentre les responsabilités sur un responsable de processus qui apportera un meilleur contrôle au service du client (Sarden et Engstrom, 2010). Par ailleurs, (Noguchi, 2005) argue que les MMC rendent possible le développement des principes de production par valeur ajoutée et l'obtention de certifications industrielles multi-secteurs telles que ISO 9000. (Hook et Stehn, 2008) montrent dans une

étude dédiée au sujet que les principes du *Lean Management* peuvent bien s'appliquer à l'IH.

Principale conséquence de la standardisation et du transfert des activités hors-site, les coûts afférents aux MMC sont moindres que ceux afférents aux méthodes traditionnelles. Pointée par (Taylor *et al.*, 2009), cette réduction est expliquée par des économies d'échelle par (Noguchi, 2005; Sarden et Engstrom, 2010). En effet, la centralisation et la standardisation d'une partie des activités hors-site permet de regrouper certains produits et donc d'avoir un meilleur contrôle des coûts. (Sarden et Engstrom, 2010) ajoutent que le retour sur investissement est plus rapide. Autre atout de cette standardisation, la qualité semble être accrue (Hairstans, 2010; Pan *et al.*, 2008; Taylor *et al.*, 2009) puisqu'il y a plus d'opportunités de contrôle, ce qui mène à une diminution des rebuts en fréquence et en gravité (Johnsson et Meiling, 2009). Enfin (Sarden et Engstrom, 2010) notent une uniformisation des normes qui sont ainsi moins contradictoires.

La transformation du travail qui est opérée dans ce transfert des opérations sur-site hors-site provoque une mutation des ressources nécessaires. Sur un plan humain, la main-d'œuvre connaît une importante modification. Les MMC requièrent un moins grand éventail de compétences de la part des opérateurs (Kozlovska et Spiakova, 2011; Pan *et al.*, 2008; Taylor *et al.*, 2009). En effet, le mode processus permet de découper et de simplifier les tâches de production. (Pan *et al.*, 2008) expliquent aussi que les MMC nécessitent une plus faible quantité de main d'œuvre, permettant ainsi de pallier au manque de main-d'œuvre auquel plusieurs pays font face. Les ressources et méthodes de travail étant appelées à changer, il est logique que les relations clients-fournisseurs soient aussi concernées par cette transformation. (Tennant *et al.*, 2012) expliquent que la spécialisation et le développement technique des activités de chaque partie prenante augmente l'interdépendance commerciale, ce qui constitue un incitatif pour le développement de relations à plus long-terme observé aussi par (Bildsten *et al.*, 2010). (Sarden et Engstrom, 2010) soulignent des relations moins conflictuelles et le développement d'intérêts communs, menant à une meilleure coordination.

Enfin les MMC semblent être plus durables (Noguchi, 2005) que les méthodes traditionnelles, un avantage important qui prend de plus en plus de sens de nos jours. Elles ont ainsi un impact plus modéré sur l'environnement (Pan *et al.*, 2008). (Kozlovska et Spiakova, 2011) y ont consacré une étude. Les auteurs ont pu constater que, grâce à un meilleur contrôle des quantités et à de plus bas risques matériels, les déchets de construction sont diminués de moitié par rapport à la construction traditionnelle.

D.5.2 Quels sont les points de différenciation entre le secteur de l'IH et le secteur manufacturier ?

L'une des motivations des MMC est de faire connaître au monde de la construction le même essor qu'a pu connaître le secteur manufacturier à la fin du XXe siècle. Ceci est bien expliqué par (Gann, 1996) dans une étude hors revue qui compare l'IH au secteur manufacturier de l'automobile au Japon et montre qu'il y a de nombreuses similarités. Il note cependant une différence fondamentale. Contrairement à la production manufacturière, l'assemblage final des produits de l'IH se font sur chantier et non en usine, donc dans un environnement moins contrôlé. De plus, le nombre de corps de métier impliqué est plus important dans l'IH que dans le secteur manufacturier. Ainsi, il est beaucoup plus difficile de contrôler le processus de production autant sur la manière de faire que sur les ressources humaines concernées. D'autres différences majeures sont relevées par d'autres auteurs. Tout d'abord, la construction présente une forte culture de projet. En effet, d'un côté le rapport entre les clients et les producteurs n'est pas le même. Dans l'IH, le client a tendance à être impliqué dès la phase initiale de design. D'un autre côté, les activités sur-site imposeront toujours cette culture projet (Hook et Stehn, 2008). Ces dernières constituent une différence majeure difficilement surmontable. De plus, chaque bâtiment ayant ses particularités, les produits de l'IH ont un plus fort degré de personnalisation, ce qui complique notamment les contrôles de qualité (Johnsson et Meiling, 2009). Par ailleurs, comme expliqué plus tôt, le secteur des MMC étant apparu plus récemment, il est donc normal de trouver des différences dans le développement des deux secteurs (Bildsten *et al.*, 2010; Johnsson et Meiling, 2009).

D.5.3 Quels sont les problèmes majeurs que rencontre l'industrie du préfabriqué ? Et s'il y a lieu, quelles sont les solutions proposées ?

Tout d'abord il faut noter que le changement de paradigme que représente la transformation de l'industrie de la construction peut en soi être source de problèmes. (Hook et Stehn, 2008) pointent des éléments qui sont inhérents à la jeunesse du secteur et à traiter en priorité. Il s'agit de la forte culture de projet qui est un frein considérable, le manque de processus intégrés d'assurance qualité et le manque de programmes d'amélioration continue. (Pan *et al.*, 2008) notent la culture conservatrice des entreprises qui ont des difficultés à se défaire de la culture de projet ou encore le coût d'entrée sur le marché assez élevé. En effet, le secteur étant très fragmenté, il y a beaucoup de petits entrepreneurs qui ne parviennent pas à réaliser l'investissement nécessaire à la mise en place d'infrastructures pour pouvoir entrer en concurrence avec d'autres entreprises déjà présentes sur le marché de l'IH. (Sarden et Engstrom, 2010) expliquent que même si les MMC réduisent les incertitudes de délais, de qualité et de coûts dans les processus de production, de nouvelles incertitudes apparaissent. Elles sont principalement dues à la nouveauté des méthodes. En effet, d'un côté les clients ont moins de choix dans le design et moins de possibilités de modification et de l'autre, les constructeurs font face à de nouveaux processus, de nouveaux besoins, de nouvelles pratiques et des prises de décisions plus précoces. L'étude expose que ces incertitudes s'estomperont simplement avec le temps.

Il semble aussi y avoir un manque de documentation, notamment au niveau des processus de prise de décisions (Taylor *et al.*, 2009). (Pan *et al.*, 2008) relèvent un manque d'information et de conseil pour les entrepreneurs. Ils préconisent de développer l'apprentissage organisationnel et d'investir dans la formation des gestionnaires. (Johnsson et Meiling, 2009) montrent qu'au sein même des entreprises, les informations disponibles sont peu, voire pas, exploitées. Elles devraient l'être afin de développer l'apprentissage organisationnel au sein de chaque entreprise qui pourrait ensuite propager à l'ensemble de la chaîne logistique. Les auteurs insistent d'ailleurs sur l'importance d'investir davantage dans cette dernière pour que le rapport de force soit remplacé par des relations de confiance et que les risques soient partagés entre les différents acteurs (Tennant *et al.*, 2012).

Le contrôle de la qualité étant complexe à mettre en place dans le cadre de la construction traditionnelle, il est souvent oublié et ce défaut perdure dans la construction préfabriquée.

Cela pourrait être aisément corrigé puisque (Johnsson et Meiling, 2009) estiment que la majorité des rebuts sont des rebuts d'usine. Ils préconisent aussi la mise en place de processus de traitement des défauts afin de pallier à ce problème, l'idée étant d'apprendre des erreurs commises et de créer ainsi une démarche d'amélioration continue. (Hairstans, 2010) conseille aux constructeurs de se conformer aux standards et aux certifications internationales. Cela aura aussi la conséquence de favoriser les bonnes pratiques. Par ailleurs, la capacité de production et la productivité des usines peuvent s'avérer limitées. C'est entre autres dû à des équipements et procédures peu performants. Ce problème peut être résolu en investissant dans des technologies de pointe, ce qui pourra alors contribuer à diminuer les coûts de main-d'œuvre et à améliorer la qualité (Branson *et al.*, 1990).

D.5.4 Quels outils et équipements sont ou peuvent être mis en place pour supporter la production de structures préfabriquées ?

Dans le cadre de la standardisation du travail et de la maintenance, les principes du *Lean Manufacturing* s'appliquent particulièrement bien, notamment dans un contexte de personnalisation de masse (Nahmens et Bindroo, 2011). Dans cette même vision, (Hook et Stehn, 2008) notent un point important qui est la responsabilisation des équipes de production. Cela permettra d'avoir des équipes plus motivées qui travailleront plus efficacement et de manière plus proactive.

Même si l'étude a plus de 25 ans aujourd'hui, (Branson *et al.*, 1990) recensent les différentes technologies qui peuvent être mises en place dans les entreprises œuvrant dans la IH. Il y a notamment les technologies de l'information constituent une grande source d'outils techniques et de gestion qui facilitent l'intégration de certaines fonctions. Ensuite il existe de nombreuses technologies d'automatisation comme des machines de coupe, des outils d'assemblage ou des appareils de manutention. Enfin, il est possible de faire appel à la robotique qui a fait ses preuves dans d'autres domaines. Cependant, la préfabrication étant un mode de construction particulier, les possibilités d'équipements techniques sont restreintes.

D.6 Analyse d'un cas d'études

Dans cette section, l'analyse d'une entreprise est proposée afin d'explorer comment les bonnes pratiques peuvent être appliquées dans le monde réel.

D.6.1 Présentation du cas

L'entreprise retenue pour l'étude de cas œuvre dans le secteur de la préfabrication. Elle se veut un acteur majeur du secteur de l'IH au Québec et elle est spécialisée dans la production d'éléments préfabriqués en bois tels que des panneaux de mur, des fermes de toit et des poutrelles de plancher. Elle contrôle les étapes d'achat du bois d'œuvre, de transformation et de livraison des éléments sur les chantiers. Elle prend aussi en charge la production de plans pour les clients, mais n'est pas responsable de l'assemblage des structures sur le chantier. L'étude réalisée a plus particulièrement été menée sur le processus d'assemblage des panneaux structuraux de mur. En effet, l'entreprise éprouvant une grande difficulté à recruter de la main-d'œuvre dans la région où elle exerce ses activités, elle désirait se pencher sur un processus pour lequel la quantité de main d'œuvre disponible limite le volume de production pouvant être produit. L'entreprise ne souhaitait cependant pas réaliser des changements majeurs, n'ayant ni les moyens financiers, ni le désir de transformer radicalement les méthodes de travail. L'analyse devait donc mener à des solutions permettant d'augmenter la capacité de production tout en modifiant partiellement certaines étapes de production.

D.6.2 Présentation des processus

Afin de mieux visualiser les opérations liées au processus d'assemblage de panneaux de mur structuraux, un diagramme de processus a été tracé (cf. annexe). Il s'agit d'un processus d'assemblage classique pour ce type de produit. L'atelier d'assemblage des murs reçoit l'ensemble des pièces de bois composant le mur de la part de l'atelier de coupe (0), sauf les lisses et le revêtement. Dans un premier temps, il y a trois postes de préparation. La coupe et le marquage des lisses (1), la coupe du revêtement (2) et le pré-assemblage des éléments de cadre d'ouvertures et montants (3). Les lisses sont les pièces constituant les parties supérieur et inférieur du cadre du mur. Le marquage permet de marquer sur le bois la position des goujons, pièces perpendiculaires aux lisses. Dans un second temps a lieu l'assemblage en lui-même. À partir de l'assemblage de la structure (5), il y a deux lignes de production distinctes. Les tables pivotent pour pouvoir relever un panneau contre un plan vertical puis passer à l'étape d'isolation (8). Le panneau est ensuite couché dans l'autre sens sur une autre table pivotante. Dans certains cas, il est nécessaire d'effectuer des finitions (10) qui n'ont pu être faites à la verticale. En dernier lieu, une inspection (10) du

mur est faite. Sur la gauche du diagramme, on voit apparaître la main-d'œuvre nécessaire à la conduite des tâches. Les tâches 1 et 2 par exemple sont réalisées par un seul opérateur.

D.6.3 Problèmes observés

Plusieurs visites sur site ont permis de relever des problèmes majeurs auxquels l'entreprise fait face. Tout d'abord, l'atelier d'assemblage des murs n'est pas automatisé. En effet, aucune machine ne permet de réaliser une tâche, partiellement ou complètement, de manière automatique. Ensuite, la main-d'œuvre est manquante et dans certains cas, elle est peu responsabilisée, notamment au niveau de la qualité. Aucun mode opératoire ni aucune procédure écrite sur les méthodes de travail n'existent. De tels documents sont pourtant essentiels pour endiguer les mauvaises habitudes ou les déviations à la conformité des produits. Par ailleurs, la main-d'œuvre n'a pas accès à ses performances de travail via des indicateurs visibles sur le plancher. Il y a donc un manque de documentation et d'utilisation des données disponibles. De plus, les accidents ou incidents sont fréquents. Au niveau de l'approvisionnement, les relations clients-fournisseurs sont peu développées. Également, il n'y a aucun outil de gestion centralisée de l'inventaire. Enfin, l'ordonnancement de la production est fait suivant la valeur des produits et leur date de livraison. C'est une méthode biaisée, car la valeur n'est pas indexée uniquement sur le temps de travail de la main d'œuvre. De plus, au sein de l'atelier de production, dès qu'une table d'assemblage est disponible, le prochain panneau dans la liste de livraison est attribué à cette même table, peu importe le produit considéré.

D.6.4 Suggestions d'améliorations

Après une étude en détail du processus d'assemblage des panneaux de mur structuraux et de la demande, un ensemble de six améliorations ont pu être proposées. Elles peuvent toutes être appliquées seules, mais rien n'empêche d'en combiner quelques-unes pour obtenir de meilleurs résultats. Ces améliorations ne visent que le processus de production en lui-même et ont pour but principal d'augmenter la capacité de production. Tous les problèmes cités ci-dessus ne seront donc pas tous traités.

D.6.4.1 *Description et impact*

Pour chaque amélioration, l'idée générale et les impacts qu'elles peuvent avoir sur le processus sont ici détaillés.

Famille de produits : La demande actuelle n'est pas fixe dans le temps. En effet, selon la période de l'année, ce n'est pas le même marché qui est visé. Il y a donc une alternance entre l'été où des murs isolés sont produits et l'hiver où des murs creux sont plutôt produits. Il pourrait donc être intéressant lors des périodes transitoires d'opter pour deux lignes de production distinctes, l'une pour murs isolés, l'autre pour murs creux. L'entreprise possède déjà ces deux lignes, il suffirait de les distinguer pour permettre de garder des flux tendus lors de ces périodes transitoires et d'être ainsi plus efficace.

Guides lasers : Cette solution consiste à poser des viseurs lasers à la verticale du poste d'assemblage structure (5) pour faciliter la pose des différentes pièces et réduire la nécessité de plans papiers. Cet outil permet d'indiquer sur la table d'assemblage, à l'aide de pointeurs, les positions des pièces à assembler. Plusieurs viseurs sont toutefois nécessaires pour éviter les erreurs de lecture liées à l'incidence des faisceaux lasers. Cela permettrait aux opérateurs de travailler plus rapidement et le risque d'erreur à ce poste serait plus faible. De plus, le marquage des lisses deviendrait inutile, ce qui réduirait du même coup le temps de travail au poste de préparation des lisses (1). Ce poste pourrait même être supprimé si la coupe des lisses était confiée à l'atelier de coupe.

Écrans de guidage : Cette amélioration consiste à poser des écrans en hauteur pour permettre aux employés de visualiser le travail à effectuer étape par étape, sans avoir recours à des plans papiers aux étapes de pré-assemblage des ouvertures (3) et d'assemblage de la structure (5). Cette amélioration permettrait un gain de temps et une baisse du risque d'erreur.

Table de pré-assemblage des ouvertures : À l'heure actuelle, seuls les montants et linteaux des ouvertures sont préparés séparément sur un établi. L'installation d'une table de pré-assemblage permettrait de préparer des ouvertures de manière plus complète, c'est-à-dire des cadres complets. Cette solution représente un transfert de la charge de travail d'un

poste potentiellement goulot, l'assemblage de la structure (5), à un autre, le pré-assemblage des ouvertures (3), ce qui équilibrerait mieux la production.

Poste de coupe d'entremises : Les entremises sont coupées au fur et à mesure qu'elles sont posées. La création d'un poste de préparation supplémentaire permettrait de gagner en efficacité sur le poste d'assemblage de la structure (5) en y réduisant la charge de travail. Cette modification a pour défaut de nécessité de la main-d'œuvre supplémentaire. Il serait donc intéressant de la coupler avec une autre amélioration.

Station d'assemblage : Il s'agit ici d'automatiser partiellement le poste d'assemblage de la structure (5). Un automate permettrait de réaliser à partir des plans l'assemblage de la plupart des structures. À l'aide de pinces et de cloueuses, l'automate assemble les pièces de bois positionnées par un opérateur. Il existe plusieurs modèles sur le marché. Certains plus complexes sont aussi équipés de butés pour positionner les pièces et d'écrans de contrôle pour aider l'opérateur dans sa tâche. Cela apporterait un gain de temps tout en diminuant la quantité de main d'œuvre nécessaire et le niveau de difficulté du travail pour cette dernière. Une augmentation de la qualité serait donc probablement observée. Toutefois cette amélioration peut nécessiter, selon les spécifications de la machine, d'augmenter le niveau de pré-assemblage des ouvertures (portes et fenêtres).

D.6.4.2 Mise en place

Une modification du processus de production n'est pas anodine. Il y a bien souvent un investissement à réaliser et une complexité de mise en œuvre. Cette complexité peut venir de différents points, de la main d'œuvre, de l'aménagement actuel, des habitudes plus ou moins ancrées, etc., mais aussi tout simplement de l'ampleur de la modification en tant que tel. Le tableau ci-après présente, pour chaque amélioration, l'investissement et la complexité de mise en œuvre attendus. Il est toutefois important de rappeler que chaque modification nécessite de former le personnel impliqué. Cela représente un investissement supplémentaire à considérer.

Amélioration	Investissement	Complexité
--------------	----------------	------------

Famille de produits	0	Faible
Guides lasers	+ (Viseurs lasers)	Faible
Écrans de guidage	+ (Écrans)	Faible
Table de pré-assemblage des ouvertures	+ (Table)	Moyenne
Poste de coupe d'entremises	++ (Personnel supplémentaire ou à détacher d'ailleurs)	Moyenne
Station d'assemblage	+++ (Station d'assemblage & logiciel)	Haute

Tableau 3 – Évaluation de l'investissement et de la complexité de chaque amélioration

D.7 Conclusion

Cet article a voulu faire un état des lieux de la gestion de la production dans la construction industrialisée tout en s'intéressant aux façons d'améliorer la capacité de production des entreprises du secteur. Une revue de la littérature a donc permis de présenter le secteur de l'IH en le comparant à la construction traditionnelle et au secteur manufacturier. Fort est de constater que les MMC manquent encore de développement à l'heure actuelle. En effet, les problèmes majeurs soulignés par les auteurs sont liés au manque de documentation et de communication en interne comme au sein de la chaîne logistique, à un trop faible développement des processus de contrôle de la production et à un manque d'investissement dans les technologies de fabrication. Par ailleurs, l'étude de cas a permis d'observer un processus de production du secteur de l'IH, de relever la problématique majeure à laquelle fait face l'entreprise en question et d'y répondre en amenant des améliorations potentielles au processus de production. Ces améliorations peuvent prendre plusieurs formes : ajout d'équipement (guides lasers, écrans de guidage, pont de clouage, station d'assemblage), réaménagement des lieux de travail (table de pré-assemblage des ouvertures, poste de coupe d'entremises) ou réordonnancement des tâches (Famille de produits).

Après une première étape de modélisation d'un processus de production de structures préfabriquées, cette étude se poursuivra en utilisant la simulation afin d'estimer de manière quantitative l'impact réel de ces suggestions ainsi que l'investissement que cela représente. Le but sera alors d'optimiser ce processus de production.

D.8 Références

- Bildsten, L., Rehme, J., and Brege, S., 2010, Applying the kraljic model to the construction sector: The case of a prefab housing factory. *26th Annual Conference of the Association of Researchers in Construction Management (ARCOM 2010)*, p. 1029–1037.
- Branson, T.R., Elshennawy, A.K., Swart, W.W., and Chandra, S., 1990, Automation technologies for the industrialized housing manufacturing industry. *12th Annual Conference on Computers and Industrial Engineering*, Orlando, FL, United States, vol.19, p 587–592.
- Broadway, R.S., and Mullens, M.A., 2004. Shop-floor information systems for industrialized housing production. *IIE Annual Conference and Exhibition 2004*, p. 2203–2208.
- Egebo, T., Richardson, P., and Lienert, I., 1990. Modèles de l'investissement résidentiel pour les grands pays de l'OCDE. *Revue économique de l'OCDE*, 14, p. 165–207.
- Gann, D.M., 1996. Construction as a manufacturing process ? Similarities and differences between industrialized housing and car production in Japan. *Construction Management and Economics*, 14, p. 437–450.
- Hairstans, R., 2010. Timber offsite Modern Methods of Construction. *11th World Conference on Timber Engineering 2010 (WCTE 2010)*, p. 2006–2010.
- Hook, M., and Stehn, L., 2008. Applicability of lean principles and practices in industrialized housing production. *Construction Management and Economics*, 26, p. 1091–1100.
- Johnsson, H., and Meiling, J.H., 2009. Defects in offsite construction: Timber module prefabrication. *Construction Management and Economics*, 27, p. 667–681.
- Kozlovska, M., and Spiakova, M., 2011. Modern methods of construction vs. construction waste. 11th International Multidisciplinary Scientific Geoconference and EXPO (SGEM 2011), p. 483–490.
- Nahmens, I., and Bindroo, V., 2011. Is customization fruitful in industrialized homebuilding industry? *Journal of Construction Engineering and Management*, 137, p. 1027–1035.
- Noguchi, M. (2005). Japanese manufacturers' "cost-performance" marketing strategy for the delivery of solar photovoltaic homes. In *Solar World Congress 2005: Bringing Water to the World, Including 34th ASES Annual Conference and 30th National Passive Solar Conference*, p. 2341–2348.

- Pan, W., Gibb, A.G.F., and Dainty, A.R.J., 2008. Leading UK housebuilders' utilization of offsite construction methods. *Building Research and Information*, 36, p. 56–67.
- Sarden, Y., and Engstrom, S., 2010. Modern methods of construction: A solution for an industry characterized by uncertainty? *26th Annual Conference of the Association of Researchers in Construction Management (ARCOM 2010)*, p. 1101–1110.
- Taylor, M.D., Fisher, A., and Wamuziri, S.C., 2009. A comparison of modern methods of bathroom construction: A project case study. *25th Annual Conference of the Association of Researchers in Construction Management (ARCOM 2009)*, p. 1173–1182.
- Tennant, S., McCarney, M., and Tong, M.K.L., 2012. Re-engineering the construction supply chain: Transferring on-site activity, offsite. *28th Annual Conference of the Association of Researchers in Construction Management (ARCOM 2012)*, p. 739–749.
- Tranfield, D., Denyer, D., and Smart, P., 2003. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, 14, p. 207–222.
- La base de données de l'OCDE sur le logement abordable - OCDE.

D.9 Annexes

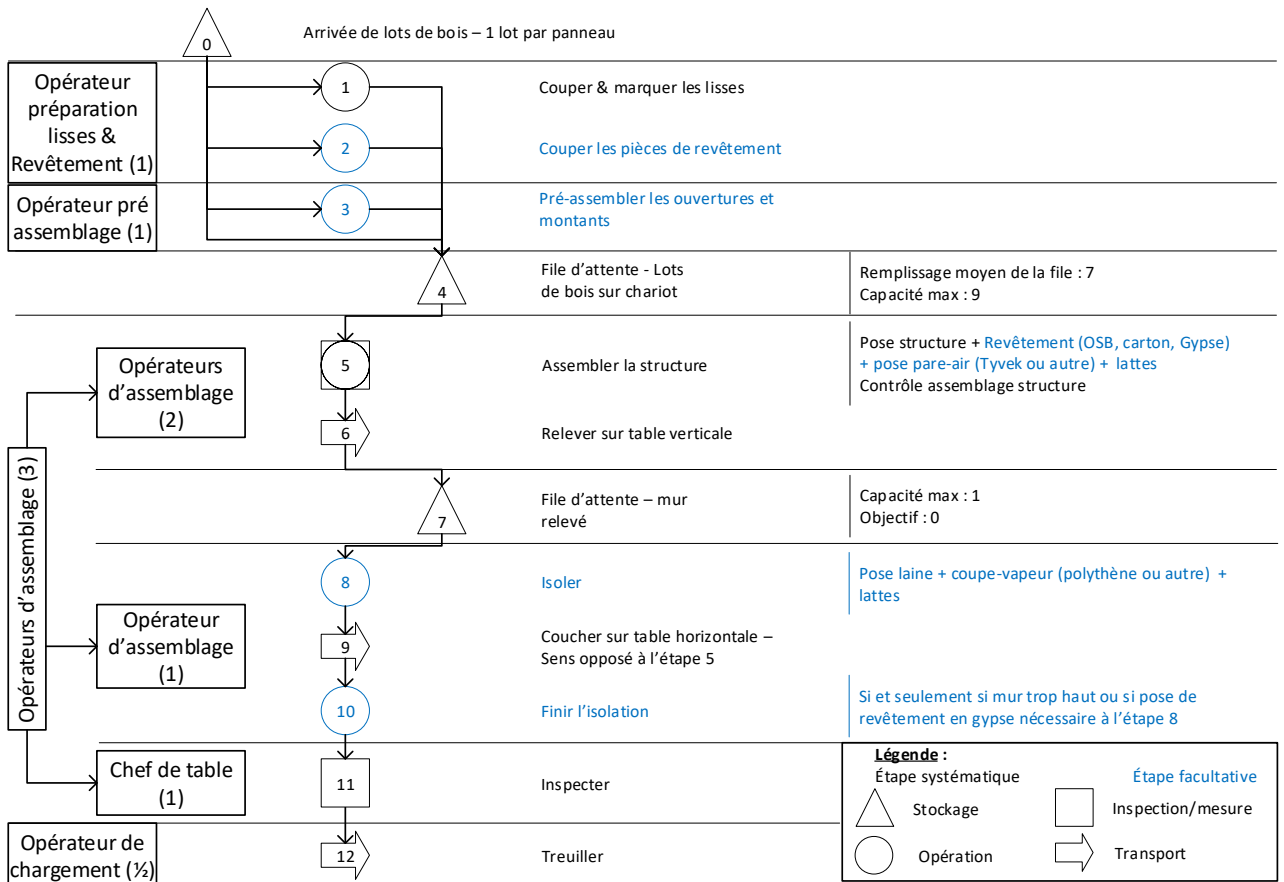


Figure 2 - Diagramme de processus de production – Atelier Murs