

Université
de Liège



Optimisation du flux de production en usine et sur chantier d'un système constructif industrialisé de bâtiment

Jury : P. LECLERCQ, D. SCHMITZ, J.-M. FRANSSEN,
S. KUBICKI et G. DUYCKAERTS

Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master
Ingénieur Civil des Constructions
COLLARD Bruno - Année académique 2012 - 2013

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon promoteur, le Professeur Pierre Leclercq pour ses conseils dans l'élaboration de ce travail.

Je tiens à remercier également mon co-promoteur, Monsieur Dimitri Schmitz pour le temps qu'il m'a consacré, son suivi hebdomadaire et les discussions fructueuses que nous avons eues à propos du sujet étudié.

Je tiens aussi à remercier les membres de mon jury, le Professeur Jean - Marc Franssen et Monsieur Sylvain Kubicki d'avoir accepté de juger de la qualité de mon travail.

J'aimerais remercier Monsieur Gaëtan Duyckaerts, ingénieur en recherche et développement de l'Atelier de l'Avenir, également membre de mon jury, pour les précieuses informations apportées à propos du système constructif CIMEDE et de l'aide dans les décisions à prendre concernant les hypothèses relatives à l'étude menée.

Mes remerciements vont pareillement à Messieurs Alain Klinkenberg, directeur de l'Atelier de l'Avenir, Frédéric Verdin, architecte de l'Atelier de l'Avenir et Jean - Baptiste Laurent, ingénieur de production de l'Atelier de l'Avenir tout d'abord pour leur chaleureux accueil au sein de l'entreprise mais également pour leurs conseils.

Merci à toutes les personnes qui de près ou de loin ont collaboré à la rédaction de ce travail, notamment mes parents pour leur soutien et la relecture de ce travail et Monsieur Julien Brusten pour ses explications efficaces à propos de l'éditeur de texte employé.

Finalement, je remercie l'ensemble du corps enseignant de l'Université de Liège qui m'a permis d'acquérir et de développer les outils nécessaires à la réalisation de mon travail de fin d'études et à mon épanouissement dans le domaine de la construction.

Résumé

Le concept de chaîne de production a, depuis son élaboration par l'entreprise Ford, au début du siècle dernier, fait verser beaucoup d'encre. L'industrie japonaise s'est ensuite directement intéressée au sujet, et notamment l'entreprise Toyota dont l'ingénieur, Taiichi Ohno, a modifié les concepts fondamentaux de la chaîne de production de Ford. Il a fait évoluer ce flux poussé, générant énormément de stocks, vers un flux tiré, visant à évincer tous gaspillages et à améliorer la productivité des entreprises. C'est à cette époque que la notion de *lean* est apparue.

Le domaine de la construction est, contrairement au domaine de la production industrielle, un domaine accusant énormément de délais, de pertes d'énergie, de retards, générant d'importants investissements. C'est pourquoi certains chercheurs se sont alors posé la question de l'application du *lean* à la construction en vue d'augmenter le rendement sur chantier.

D'autres chercheurs ont ensuite imaginé de réduire les temps d'exécution sur chantier. C'est ainsi que la préfabrication d'éléments structuraux en usine a alors vu le jour.

La réflexion a encore été poussée un plus loin via l'industrialisation d'éléments structuraux dont l'objet est la standardisation de ces derniers, contrairement à la préfabrication, et pour laquelle une production à la chaîne pouvait être envisagée.

Ce travail traite du sujet du *lean manufacturing* et du *lean construction* à travers l'analyse d'un cas concret de construction industrialisée de bâtiment. Ce projet, dont le nom est CIMEDE pour Construction Industrielle de Maisons Evolutives, Durables et Economiques, a vu le jour il y a quatre ans. La production a débuté depuis un an et à l'heure actuelle, un seul bâtiment a été construit prouvant la jeunesse du projet. Des pistes d'optimisation de la production en usine et sur chantier du système constructif via l'application des principes *lean* ont été développées dans ce travail.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Prémices	1
1.2	Énoncé de la problématique	2
1.3	Contexte du travail	3
1.4	Contenu	4
2	Théorie	5
2.1	Historique - Ford versus Toyota	5
2.2	Production industrielle	7
2.2.1	Vision traditionnelle	7
2.2.2	Lean Manufacturing	9
2.3	Domaine de la construction	17
2.3.1	Vision traditionnelle	17
2.3.2	Lean Construction	21
2.4	Value Stream Mapping - Cartographie des flux de valeur	27
2.4.1	Spécification de l'unité de production	29
2.4.2	Cartographie de l'état courant	30
2.4.3	Indicateurs quantitatifs	32
2.4.4	Flux de l'information	36
2.4.5	Cartographie de l'état futur - Optimisation de la production	37
2.4.6	Kanban	41
2.5	Flow Process Chart	43
2.6	Résumé des notions théoriques utiles dans l'analyse du système CIMEDE	44
3	État de l'art	46
3.1	Value Stream Mapping et lean manufacturing	46
3.2	Value Stream Mapping et lean dans le domaine de la construction	47
3.2.1	Chargement des processus de construction	50
3.2.2	Préfabrication et industrialisation	51
3.3	Système modulaire industrialisé et personnalisation	52
3.4	Mesure de productivité et systèmes constructifs industrialisés de bâtiments	53
3.4.1	Etude d'un cas concret : érections de poteaux métalliques	53
3.4.2	Etude d'un cas concret : construction métallique	56

3.4.3	Etude de cas : l'état du secteur immobilier en Inde	58
3.5	Empire State Building	58
3.6	Intégration d'outils de communication tel que le BIM en construction . . .	60
3.7	Mauvaise compréhension des concepts lean	61
4	CIMEDE	62
4.1	Système constructif	62
4.2	Composition des éléments CIMEDE	63
4.2.1	Composition des murs	64
4.2.2	Composition des planchers	68
4.2.3	Composition des cloisons	72
4.2.4	Éléments de finition	74
5	Méthodologie	76
5.1	Compréhension des biens produits	76
5.2	Compréhension de la production CIMEDE	76
5.3	Définition de l'unité de mesure	78
5.4	Production en atelier	78
5.4.1	Prise des temps	78
5.4.2	Analyse des résultats	79
5.5	Étude de la mise en œuvre : partie structure	79
5.5.1	Prise des temps	79
5.5.2	Analyse des résultats	80
5.6	Étude de la mise en œuvre : partie finitions	81
5.6.1	Prise des temps	81
5.6.2	Analyse des résultats	82
5.7	Analyse globale du système	82
5.8	Moyens d'optimisation	82
5.9	Difficultés rencontrées dans le cas étudié	83
6	Résultats	84
6.1	Hypothèses de calcul	84
6.1.1	Objet de l'étude - Maison type	84
6.1.2	Hypothèses propres à la production	87
6.2	Installations de la chaîne de production	89
6.3	Vue globale du système - état actuel	91
6.4	Production en atelier	93
6.4.1	Approvisionnement de la ligne d'assemblage	93
6.4.2	Production des murs	97
6.4.3	Production des planchers	100
6.4.4	Bilan de la production	102
6.5	Préparation du chantier	103
6.6	Montage de la structure	105
6.6.1	Contexte	105

6.6.2	Transport	107
6.6.3	Montage des murs	108
6.6.4	Montage des planchers	109
6.6.5	Montage des acrotères	110
6.6.6	Première étanchéité	111
6.6.7	Bilan du montage	111
6.7	Finitions	115
6.8	Cartographie globale du système constructif	117
6.8.1	Analyse globale de la VSM	117
6.8.2	Analyse des résultats numériques	119
6.9	Analyse Five-Why	120
6.9.1	Problème lors de l'exécution du gros œuvre	121
6.9.2	Problème durant les finitions	124
6.10	Optimisation du système constructif	125
6.10.1	Finitions extérieures	126
6.10.2	Finitions intérieures	126
6.11	Utilisation des ressources	127
7	Discussion	129
7.1	Résultats	129
7.1.1	Contexte	129
7.1.2	Explication des résultats	129
7.1.3	Intérêt de l'application du lean	130
7.2	Méthode d'analyse	131
7.2.1	Cartographie des flux de valeur	131
7.2.2	Analyse Five-Why	132
7.2.3	Analyse financière	132
7.3	Pistes d'optimisation du système : Flux de production	133
7.3.1	Production	133
7.3.2	Montage structure	134
7.3.3	Finitions	135
7.4	Piste d'optimisation du système : Flux de l'information	136
7.4.1	Atelier de production	136
7.4.2	Chantier	137
7.4.3	Lien entre le chantier et l'Atelier	137
7.5	Contrôle de qualité	138
7.6	Standardisation	138
8	Conclusion	139
8.1	Rappel de la problématique	139
8.2	Contenu	140
8.3	Système CIMEDE	140
8.4	Association du lean et d'un système de construction industrialisé	141
8.5	Perspective	142

A Définitions	143
B Tableaux de prise de temps	149
B.1 Code couleur	149
C Variabilité des temps de mise en œuvre - Gros œuvre	163
D Flow Process Chart	165
E Diagramme Gantt du déroulement des finitions	173
F Rendements pour les finitions intérieures	175
G Proposition d'optimisation pour les finitions intérieures	177

Table des figures

1.1	Constructions Industrialisées de Maisons Évolutives, Durables et Économiques - [Sch12]	3
1.2	Système constructif CIMEDE - [Ave13]	4
2.1	Courbe d'apprentissage	8
2.2	Flux poussé vs. flux tiré	9
2.3	Amélioration continue - Kaizen [RS03]	12
2.4	Amélioration continue vs. Innovation [Bed11]	12
2.5	Production selon un flux tiré [RS03]	13
2.6	Rôle de chaque processus	14
2.7	Alternance de production [RS03]	15
2.8	Diversité des acteurs dans un projet de grande envergure [Kub12]	17
2.9	Utilisation du temps par les ouvriers [FA10]	18
2.10	Exemple de planning de Gantt appliqué à la construction d'un bâtiment de bureaux en structure bois [CVFH12]	20
2.11	Distinction des raisons de non-complétion de tâches [FA10]	21
2.12	Flux de travail dans le <i>Last Planner® System</i> [FA10]	24
2.13	Réunion de chantier basée sur le LPS [FA10]	24
2.14	Percentage of Projects Complete - PPC	25
2.15	5-Pourquoi ?	26
2.16	Curatif-Correctif [Bed11]	27
2.17	Cartographie de flux de valeur - Symboles [RS03]	28
2.18	Cartographie de flux de valeur - Première étape [RS03]	28
2.19	Matrice de produits [RS03]	30
2.20	Cartographie de flux de valeur - État courant [RS03]	30
2.21	Lien FIFO [RS03]	31
2.22	Lead time [RS03]	32
2.23	Temps de cycle [RS03]	33
2.24	Temps de création de valeur [RS03]	33
2.25	Comparaison <i>lead time</i> et temps de création de valeur [RS03]	34
2.26	Association de processus synchronisés	35
2.27	Programmation du dernier processus de la chaîne [RS03]	37
2.28	État futur de la production [RS03]	37

2.29	Comparaison entre le temps de cycle et le takt time [RS03]	38
2.30	Distribution au terme de la chaîne de production [RS03]	38
2.31	Comparaison du temps de cycle et du takt time suite à l'association de processus consécutifs [RS03]	39
2.32	Système de <i>kanban</i> implémenté sur un changement de production [RS03]	40
2.33	Cartographie des flux de valeur de l'état futur [RS03]	41
2.34	Système de <i>kanban</i> [RS03]	42
2.35	Exemple de diagramme de flux dans un processus [LDSB99]	44
3.1	Sources de gaspillages dans le domaine de la construction [Kos92]	50
3.2	Stratégies de chaînes d'approvisionnement [BPD ⁺ 03]	52
3.3	Matrice d'identifications des stratégies de chaînes d'approvisionnement [BPD ⁺ 03]	53
3.4	3 types de production [ASDSM99]	54
3.5	Paramètres conditionnant la production [ASDSM99]	54
3.6	PPC journaliers pour différents scénarios de production [ASDSM99]	55
3.7	Érection d'une structure métallique - Amélioration du système initial [LDSB99]	56
3.8	<i>Flow process chart</i> du système optimisé [LDSB99]	57
3.9	Comparaison du système initial avec le système amélioré [LDSB99]	57
3.10	Avancement de la construction de l' <i>Empire State Building</i> [SP09]	59
4.1	Système constructif CIMEDE	63
4.2	Structure du système CIMEDE	63
4.3	Vue en élévation d'un mur CIMEDE	64
4.4	Composition des murs CIMEDE [dl13]	65
4.5	Coupe dans un mur extérieur de base CIMEDE	66
4.6	Coupe dans un mur extérieur CIMEDE avec toutes les options	66
4.7	Insert et élingue de manutention des murs CIMEDE	67
4.8	Membrane pour l'étanchéité à l'eau et à l'air	67
4.9	Partie femelle KNAPP	68
4.10	Partie mâle KNAPP	68
4.11	Vue en plan et composition interne d'un plancher CIMEDE	68
4.12	Coupe dans un plancher de base CIMEDE avec chape humide	69
4.13	Composition des planchers CIMEDE [Cat12b]	70
4.14	Coupe dans un plancher CIMEDE avec toutes les options et une chape sèche	71
4.15	Composition des cloisons CIMEDE [dl13]	73
4.16	Composition d'une cloison CIMEDE [Cat12a]	73
4.17	Composition des cloisons CIMEDE - Finitions avec panneaux prépeints MDF [dl13]	74
4.18	Système d'accroche des panneaux de finitions sur les cloisons	74
4.19	Fixation supérieure des cloisons	75
4.20	Fixation inférieure des cloisons	75
5.1	Cartographie des flux de valeur initiale	77

5.2	Exemple de fiche de prise de temps pour la production en atelier	79
5.3	Disposition des caméras IP sur le chantier de l'Atelier de l'Avenir	80
5.4	Moniteur de surveillance branché aux caméras IP	80
5.5	Disposition des caméras de surveillance	81
6.1	Batterie de 3 maisons types	85
6.2	Plans d'une maison type étudiée	85
6.3	Éléments préfabriqués d'une maison type avant montage	86
6.4	Maison CIMEDE montée et implantée - Façade avant	87
6.5	Maison CIMEDE montée et implantée - Façade arrière	87
6.6	Superposition des tâches vs. subordination des tâches	88
6.7	Évolution du stockage au cours du temps	88
6.8	Installations de la chaîne de production CIMEDE	90
6.9	Centre usinage - AdM - WEINMANN WBZ 160	91
6.10	Tables d'assemblage et pont multifonction - WEINMANN WBZ 120	91
6.11	Zone de chargement des camions	91
6.12	Zone de stockage produits-finis et table levante	91
6.13	Vue en plan des installations de la ligne de production CIMEDE	92
6.14	Cartographie des flux de valeur initiale du système constructif CIMEDE	93
6.15	VSM du processus relatif au fourniture de la ligne d'assemblage	96
6.16	Comparaison des C/T de l'approvisionnement avec le TT pour une maison entière	96
6.17	VSM du processus relatif à la production des murs CIMEDE	97
6.18	Processus global relatif à la production des murs CIMEDE	98
6.19	Répartition du temps nécessaire à l'assemblage d'un mur	100
6.20	Assemblage de la structure d'un mur sur la table 1	100
6.21	Déplacement de la table 3 vers l'axe du pont multifonction	100
6.22	VSM du processus relatif à la production des planchers CIMEDE	101
6.23	Processus global relatif à la production des planchers CIMEDE	101
6.24	Répartition du temps nécessaire à l'assemblage de 2 planchers	102
6.25	Préparation des solives de plancher sur les tréteaux	102
6.26	Remplissage d'isolant de deux planchers en parallèle sur la table 2	102
6.27	Comparaison des C/T des processus de la chaîne de production et du TT	103
6.28	Coupe de la préparation du chantier avant le montage de la structure	104
6.29	VSM de la préparation du terrain	104
6.30	Comparaison des C/T des processus relatifs à la préparation du chantier et du TT	105
6.31	Bureaux de l'Atelier de l'Avenir - Fin du gros-œuvre	106
6.32	VSM du transport sur site de la structure CIMEDE	108
6.33	VSM du montage sur site des murs CIMEDE	109
6.34	VSM du montage sur site des planchers CIMEDE	110
6.35	VSM du montage sur site des acrotères CIMEDE	111

6.36	Processus relatif à la première étanchéité du bâtiment à la fin du montage de ce dernier	112
6.37	Montage des bureaux de l'Atelier de l'Avenir	112
6.38	VSM du montage de la structure d'une maison type CIMEDE	113
6.39	Comparaison des C/T des processus relatifs au montage sur site et du TT	114
6.40	Diagramme Gantt représentant le déroulement des finitions intérieures des bâtiments CIMEDE	116
6.41	Exemple d'un diagramme causes - conséquences	121
6.42	Visualisation du mur problématique	121
6.43	Discontinuité dans le panneau de VIDIWALL du pignon 3	122
6.44	COMPRIBAND pour assurer l'isolation acoustique [Bar11]	123
6.45	Disposition des COMPRIBAND sur les éléments de plancher et de toiture	123
6.46	Réseau causes - conséquences d'un problème d'exécution	123
6.47	Rainure dans le VIDIWALL du pignon 3 sur chantier - perte de temps	124
6.48	Forçage sur la structure imprévu - perte de temps	124
6.49	Sabots de support des cloisons collés au sol - repères difficiles	125
6.50	Fixations des cloisons complexes et non standards - perte de temps	125
6.51	Réseau causes - conséquences d'un problème de finitions	126
6.52	VSM des finitions extérieures du bâtiment CIMEDE	127
6.53	Utilisation des ressources humaines durant le montage des bureaux de l'Atelier de l'Avenir	128

Chapitre 1

Introduction

1.1 Prémices

Début du siècle dernier, Henry Ford révolutionne le milieu industriel en concevant une méthode organisationnelle de travail à la chaîne permettant la production de la célèbre FORD T. Quelques dizaines d'années plus tard, Taiichi Ohno, ingénieur industriel japonais, travaillant pour l'entreprise TOYOTA, s'intéresse à ce concept de travail à la chaîne et y décèle pas mal d'inconvénients. Il relève que le flux poussé mis en œuvre dans l'entreprise américaine génère d'importants stockages et d'importantes pertes d'énergie. Taiichi Ohno envisage donc d'optimiser cette production. Il supprime tous ces gaspillages et crée alors ce qu'on appelle aujourd'hui le concept du *lean manufacturing*. Plusieurs traductions françaises ont été proposées pour le mot *lean* à savoir "mince", "flexible", "ajustée". Il semble cependant que la traduction qui convient le mieux à ce terme est "au plus juste".

L'entreprise TOYOTA a utilisé dès ses débuts les principes du *lean* pour diminuer les gaspillages dans ses processus de fabrication, ce qui a engendré son hégémonie dans le secteur de l'automobile. L'application du *lean manufacturing* devient, aujourd'hui, de plus en plus répandue dans le domaine de la production industrielle, et notamment dans le domaine de la production automobile, surtout en Europe et aux États-Unis [LDSB99].

D'autre part, bien que les avancées technologiques au cours du siècle dernier ont permis au domaine de la construction de s'illustrer d'un point de vue technique, ce secteur est connu pour représenter des investissements de budgets importants et des durées de mise en œuvre sur chantier considérables. Il s'avère que la durée de ces chantiers représente une part importante des montants investis. En effet, selon [Fer96], cité par [Pol05], "*80% de la valeur ajoutée du produit de construction est absorbée par les frais de personnel*". Les systèmes constructifs mis en place constituent également une part

importante de ces montants faramineux.

De plus, *"plusieurs études ont montré qu'au moins 30% des ressources gaspillées sont causées par des attitudes bien ancrées dans la gestion de projets. Le gaspillage dans la construction se produit surtout dans l'interaction entre les corps de métiers et dans les transferts de travail d'un corps de métier à un autre. Des études menées par l'Institut de l'industrie de la construction ont remarqué que 10% des coûts du projet est généralement consacré au travail sur le terrain et que seulement 43% du temps consacré à l'activité de construction peut être considéré comme productif"* [FA10].

C'est pourquoi une recherche visant à diminuer les durées de mise en œuvre sur chantier et à optimiser les systèmes constructifs mis en place a été menée afin de diminuer les coûts totaux des projets de construction, puisque :

"Le temps c'est de l'argent" [Fra50].

Des chercheurs ont alors tenté d'étendre la méthode d'industrialisation de TOYOTA au domaine de la construction. Certains concepteurs de projets ont élaboré différents outils nécessaires à l'application du *lean* à la construction. C'est alors que des outils de communication et de management, tel que le Last Planner[®] System (LPS), ont vu le jour [FA10].

"Le lean dans le domaine de la construction a été défini de plusieurs manières comme étant un concept d'amélioration continue. Greg Howell et Glenn Ballard, co-fondateurs du Lean Construction Institute (LCI), voient le lean construction comme une nouvelle manière de gérer la construction. Les objectifs, les principes et les techniques du lean construction forment ensemble la base d'un nouveau processus de réalisation de projets. A la base de la démarche de production TOYOTA (Toyota Production System - TPS), cette nouvelle méthode de conception de projets rend possible d'importantes améliorations dans les projets complexes, mal définis et qui nécessitent une mise en œuvre rapide." [FA10]

Lauri Koskela décrit le *lean* comme étant une façon de concevoir un système productif en minimisant les gaspillages sur l'utilisation des matériaux, du temps et des efforts afin de générer une quantité de valeur ajoutée la plus grande possible [FA10].

1.2 Énoncé de la problématique

La valeur est ce pourquoi le client est prêt à payer. *"Les clients accordent une **valeur** aux produits et aux services"* proposés. Les clients *"sont les seuls juges"* [Jal04]. Or, le domaine de la construction, comme décrit supra, ne dépeint pas un profil idéal en ce qui concerne l'ajout de valeur. En effet, plus de temps est consacré à ne pas ajouter de valeur

qu'à en ajouter.

Une nouvelle méthode constructive, basée sur la préfabrication en atelier, et s'inspirant du travail à la chaîne des manufactures, a été développée de manière à tenter d'accroître cette proportion de temps lors duquel de la valeur est vraiment ajoutée à la construction par rapport au temps total d'exécution, de manière à diminuer les coûts de cette dernière. Ces constructions industrialisées de bâtiments décrivent une nouvelle révolution de la construction. Certains systèmes constructifs misent également sur l'aspect modulaire, voire même évolutif, des structures pour offrir au client des bâtiments personnalisés à moindres coûts.

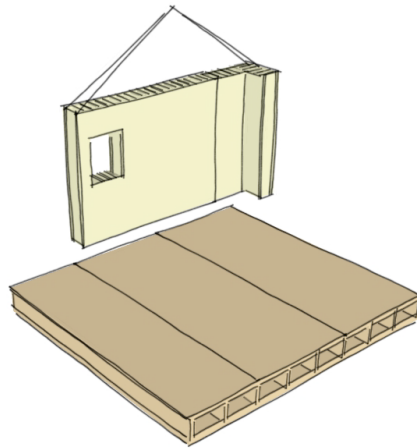


FIGURE 1.1 – Constructions Industrialisées de Maisons Évolutives, Durables et Économiques - [Sch12]

De manière à diminuer encore ce temps de non-crédation de valeur, la question à se poser est de voir les implications du *lean* appliqué à un système constructif industrialisé de bâtiment. Ce travail a pour objectif d'étudier les gains de productivité générés par cette association et de tirer des conclusions à propos de la performance de cette synergie.

1.3 Contexte du travail

Le cas d'étude est le projet de recherche CIMEDE qui est l'acronyme de Construction Industrielle de Maisons Evolutives, Durables et Economiques et dont le premier chantier a été réalisé au mois de mars 2013. Ce projet s'inscrit dans le cadre de l'appel à projet du plan Marshall "Développement durable - Réchauffement climatique" et vise la réalisation de logements sociaux passifs et "bon marché" dont la structure est réalisée d'éléments structuraux en bois assemblés en usine et ensuite montés sur chantier.

Ce projet est mis en application au sein de l'Atelier de l'Avenir, basé dans le parc d'activités économiques de Grâce-Hollogne, et dont la maison mère, les Ateliers du Monceau, excelle dans la menuiserie industrielle et la réparation de palettes en bois. L'Atelier de l'Avenir est une entreprise de travail adapté¹ engageant majoritairement un personnel ouvrier sourd et/ou mal entendant.



FIGURE 1.2 – Système constructif CIMEDE - [Ave13]

1.4 Contenu

Au cours de ce travail, différentes parties seront abordées. Dans un premier temps, un chapitre propre aux rappels théoriques relatifs à la productivité en usine et sur chantier ainsi qu'au domaine du *lean* prendra place. Ensuite, l'état de l'art énoncera les études et recherches déjà menées sur le sujet. Par après, une description détaillée du système constructif sera développée. La méthodologie employée dans l'élaboration de ce travail, visant à répondre à la problématique évoquée supra, sera ensuite abordée. Ensuite, l'étude des séquences de production en atelier et de montage sur chantier du système constructif CIMEDE sera menée proposant une modélisation générale de la production. Enfin, des pistes d'optimisation du système constructif seront discutées sur base du modèle réalisé.

1. ETA.

Chapitre 2

Théorie

Dans cette partie du travail, les rappels théoriques nécessaires à la compréhension du travail seront présentés. Dans un premier temps, les notions théoriques propres au domaine de la productivité prendront place. Ensuite, les principes idéologiques de la méthode *lean* et la notion de cartographie de flux de valeur seront présentés.

2.1 Historique - Ford versus Toyota

En 1908, Henry Ford fut le premier à mettre en œuvre le concept de flux continu dans le monde industriel. Ce système productif innovant fut à la base de la production automobile de Ford et notamment de la célèbre FORD T destinée à répondre au mieux à l'importante demande des consommateurs après la Seconde Guerre mondiale.

La méthode industrielle mise au point par Henry Ford s'établissait sur le principe de la ligne d'assemblage. Cette méthode, remettant en cause les fondements théoriques industriels du début du 20^{ème} siècle ainsi que l'organisation du travail de l'époque, se basait sur la standardisation des unités de production ce qui privilégia la consommation de masse et l'augmentation de la productivité de l'entreprise FORD.

Les principales conséquences découlant de cette méthode industrielle furent une économie d'échelle menant à la diminution des coûts de fabrication, une augmentation de la consommation ainsi qu'une maîtrise accrue du contrôle de l'enchaînement des opérations.

Bien que cette méthode permettait un accroissement de la productivité de l'entreprise FORD, elle fut le berceau d'un bon nombre de sources de gaspillage. En effet, la production FORD, ayant pour objectif de proposer au client un produit directement accessible ne nécessitant pas de délais importants, occasionna un important taux de stockage et

de pertes d'énergie dans des opérations superflues menées par des ouvriers appliquant directement les ordres donnés par les responsables de la conception du processus de production. A la sortie de l'usine FORD, un stock important de voitures identiques attendait l'arrivée du consommateur désireux d'acquérir une FORD T. La variation du nombre d'achats ne conditionnait en rien la production de FORD, conduisant à une accumulation impressionnante de voitures produites [FA10].

D'autre part, ce système productif répondait rarement aux exigences du consommateur. La production de masse ainsi créée ne pouvait assurer une personnalisation des biens de consommation et ne rencontrait pas les attentes diversifiées des acheteurs.

Ces deux principaux inconvénients retinrent l'attention de l'industriel Eiji Toyoda et de son ingénieur, Taiichi Ohno, de la TOYOTA MOTOR COMPANY quelques dizaines d'années plus tard qualifiant ces inconvénients de *muda*, terme japonais pour désigner les gaspillages. Industrie textile initialement fondée en 1926 par Sakishi Toyoda, l'oncle de Eiji Toyoda, TOYOTA ne connaît une activité automobile que dans les années 1930, sous l'influence de la fabrication en flux continu de Henry Ford.

Bien que l'entreprise FORD est reconnue à cette époque comme étant la plus efficace au monde avec une production journalière de 7000 voitures, comparée aux 2685 voitures du côté de TOYOTA en 13 ans [FA10], Ohno n'est pas convaincu par la production de masse de FORD et les gaspillages qu'elle engendre. "*La quantité élevée de stock, la main d'œuvre non qualifiée, les temps d'attente importants, les transports inutiles, le manque d'ergonomie et l'incohérence dans la suite des installations FORD*" [FA10] ne satisfaisaient pas l'ingénieur japonais. Après en avoir étudié le système dans les années 1950, Ohno imagine des pistes de solutions pour évincer les sources d'inefficacité de l'entreprise américaine. Il imagine alors un système de production basé sur le *Just-In-Time*¹ de manière à pallier au problème d'accumulation des stocks de FORD et nécessaire à satisfaire les besoins des clients au bon moment [Bal12].

Les efforts de TOYOTA pour améliorer la productivité leur a permis de produire de plus grands volumes de production à faible coût tout en garantissant une fiabilité exemplaire et une personnalisation de l'automobile rencontrant les exigences du client [FA10].

Le système de production TOYOTA est basé sur une circulation des produits coordonnée de manière à ce que le processus amont de la chaîne n'approvisionne le processus aval que lorsque ce dernier en a besoin [Ohn88]. Le rythme de travail de TOYOTA est régulé par le *takt time*, le terme *takt* étant utilisé par les musiciens allemands pour respecter le battement du métronome. Le contrôle de qualité ne nécessite plus de superviseur et est réalisé directement par les travailleurs sur la chaîne de production [FA10].

1. "Juste-à-temps" en français (JIT). Le *Just-In-Time* est une méthode de production visant à produire uniquement ce qui est vendu et/ou ce qu'on consomme limitant les stockages et l'accumulation d'en-cours sur la ligne de production [RS03].

Toutes ces optimisations permettent que la production annuelle de TOYOTA, en 1959, s'élève à 100 000 voitures [Ohn88]. TOYOTA arrive ensuite, en 1970, à produire une voiture répondant exactement aux exigences du client en 1 jour [FA10].

L'organisation industrielle imaginée par Ohno retient l'attention des institutions académiques et des chercheurs dans le domaine de la production tant les innovations imaginées par Ohno sont simples et ne représentent pas une prouesse technologique compliquée. Si bien, qu'en 1988, un chercheur du Massachusetts Institute of Technology (MIT) dans le domaine de l'industrie automobile au niveau international, John Krafcik, crée le terme **Lean** pour définir le système organisationnel industriel imaginé par Ohno.

La production de TOYOTA, personnalisée et optimisée, devient un exemple exceptionnel d'organisation industrielle et est reconnue comme étant la seconde révolution organisationnelle du XXème siècle [Mou10].

Le monde de la recherche industrielle a été séduit par les différences de performances entre les entreprises japonaises, basées sur l'idéologie du *Toyota Production System*², et les entreprises américaines, dont l'organisation est fondée sur l'esprit FORD. Le système TOYOTA devient alors un exemple mondial et déteint sur l'entière du secteur manufacturier mondial [FA10]. L'esprit *lean*, visant à produire uniquement ce qui est demandé ou vendu évitant ainsi les interruptions néfastes de processus et les tâches n'ajoutant pas de valeur, devient le centre des mentalités du secteur industriel.

Ballé exprime, en parlant de TOYOTA, le fait que *"l'aspect fascinant et inspirant de son ascension est la conquête systématique d'un marché entièrement dominé par les géants américains"* [Bal12].

2.2 Production industrielle

2.2.1 Vision traditionnelle

Productivité

La productivité est la mesure qui détermine comment les ressources sont associées et utilisées pour accomplir un certains nombre d'objectifs. La productivité se définit comme étant le rapport de ce qui est produit (*outputs*) sur ce qui est consommé (*inputs*) comme le mentionne l'équation 2.1, à la page 8. Une importante productivité se définit dès lors comme étant l'atteinte d'une performance élevée avec une faible dépense de ressources [FA10].

2. TPS.

$$\text{Productivité} = \frac{\text{Outputs}}{\text{Inputs}} \quad (2.1)$$

Il est important de noter que si le temps de production d'un bien devient plus important, mais que la qualité s'améliore, la productivité ne change pas [LA76].

Courbe d'apprentissage

En règle générale, la productivité évolue avec le temps. Lorsqu'un ouvrier réalise une tâche pour la première fois, il met un certain temps pour réaliser cette tâche. Le seconde fois qu'il réalise la tâche, l'ouvrier aura acquis certains automatismes et prendra un peu moins de temps. La troisième fois, il prendra encore un peu moins de temps et ainsi de suite. La productivité de l'ouvrier augmente donc avec le temps et en fonction du nombre de fois que la tâche est effectuée. Nous pouvons donc voir ici déjà un intérêt à ne pas changer un ouvrier de poste trop souvent afin de ne pas faire chuter sa productivité. Cette courbe d'apprentissage est visible à la figure 2.1, à la page 8.

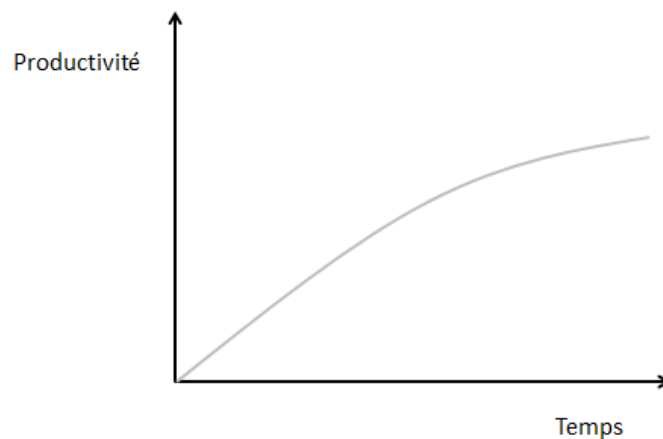


FIGURE 2.1 – Courbe d'apprentissage

On comprend aussi qu'après un certain temps, la productivité de l'ouvrier n'augmente plus aussi fort qu'au début étant donné les contraintes physiques de l'ouvrier et/ou de la machine sur laquelle il travaille. On remarque la variation de la productivité sur la figure 2.1 par une incurvation de la courbe vers le bas.

Remarquons qu'il est cependant nécessaire que les ouvriers changent de postes après un certain moment afin que la lassitude due à la monotonie de la tâche n'occasionne pas une diminution de la productivité de l'ouvrier. L'ouvrier doit changer de poste lorsque la courbe d'apprentissage commence à décroître.

2.2.2 Lean Manufacturing

Dans une entreprise traditionnelle, on retrouve habituellement une chaîne de production dont le flux de production à travers chaque poste de travail est dit "poussé". Cette méthode consiste à produire le plus possible, peu importe la demande, mais en prévision du marché [FA10]. C'est ce qui est appelé la production de masse. Ce système dépeint une succession de processus de fabrication non synchronisés : la production des processus amont ne se calquent pas sur la production des processus aval.

Cette vision de la production est à mettre en comparaison avec le nouveau système imaginé par Taiichi Ohno dans le TPS basé sur un flux dit "tiré". Cette comparaison est illustrée sur la figure 2.2, à la page 9. Ces deux notions décrivent des systèmes tentant de s'approcher le plus possible de l'idéal correspondant au flux "continu" comprenant un minimum de stock³. Le flux "tendu" est quant à lui un flux dans lequel aucun stock n'est prévu. Ce système extrêmement rigide doit faire preuve d'une grande fiabilité.

$$\text{Flux poussé} \longleftrightarrow \text{Flux tendu} \longleftrightarrow \text{Flux continu} \longleftrightarrow \text{Flux tiré} \quad (2.2)$$

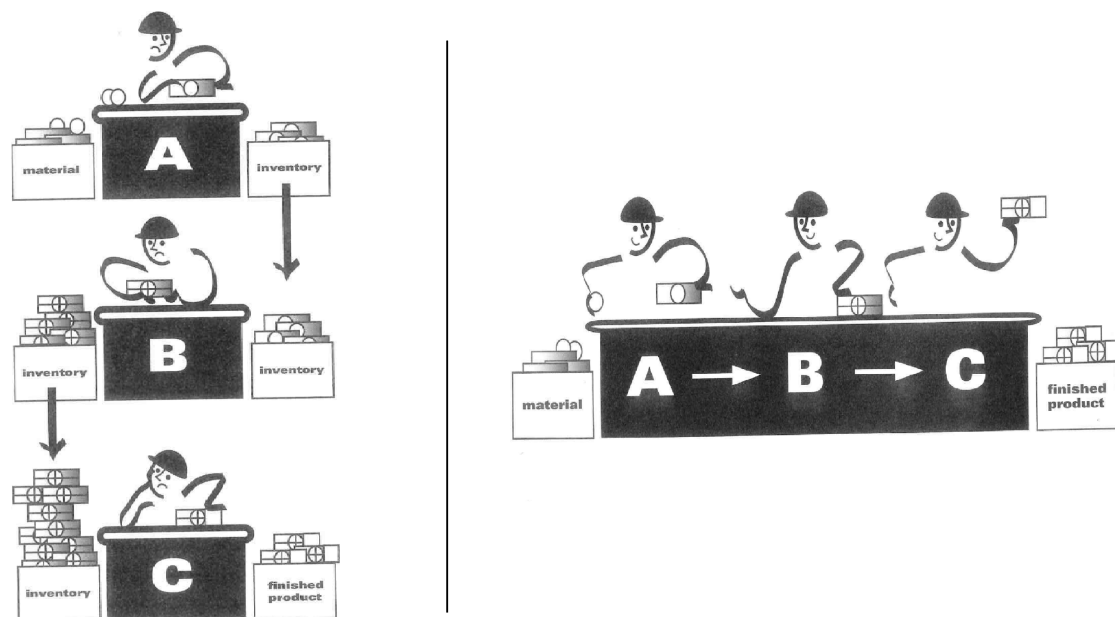


FIGURE 2.2 – Flux poussé vs. flux tiré

3. Afin de palier à l'éventuelle variabilité de la chaîne.

Muda

Parmi les processus présents au sein d'une chaîne de production, certains ajoutent de la valeur au produit en cours de transformation, d'autres pas. Percer, assembler, clouer, souder, couper, mettre à forme, etc. sont des opérations qui ajoutent directement de la valeur au produit. Transporter, stocker, emballer, contrôler, etc. sont des opérations sans valeur ajoutée. Ces dernières sont à la base d'une augmentation de temps total de production superflue. Taiichi Ohno, qui étudia scrupuleusement la méthode de production basée sur le flux poussé sur lequel reposait le système Ford, dressa une liste des gaspillages, ou "*muda*" en japonais, qu'il identifia. Ohno parvint à catégoriser les sources de gaspillages en 7 groupes [Ohn88].

1. **La surproduction** : produire trop ou trop vite ne conduit pas à une optimisation du rendement de la production,
2. **Le temps d'attente** : quand un processus attend un produit, il n'ajoute pas de valeur au produit. Le temps est alors gaspillé,
3. **Le transport et la manutention** : lorsqu'un produit est transporté au sein d'un hall industriel, il ne peut être modifié, ce qui représente un gaspillage. Il est donc recommandé de diminuer au maximum les trajets entre les processus,
4. **L'usinage superflu** : toute intervention inutile sur un produit n'ajoute pas de valeur,
5. **Les stocks** : le stock représente le gaspillage le plus important rencontré en général dans les entreprises,
6. **Les transports inutiles** : les erreurs de programmation de production conduisent souvent à des manutentions superflues de matière, ce qui représente un gaspillage d'énergie et de temps,
7. **Les défauts** : faire revenir une pièce dans la chaîne de production représente également une source de gaspillage.

Ces gaspillages sont, pour Ohno, le fruit de tâches n'ajoutant pas de valeur directement au produit. Le plus grand défi de la vision de Ohno est d'éradiquer toutes ces opérations n'ajoutant pas de valeur. Bien que, certaines tâches semblent inévitables, excepté moyennant un investissement relativement important, d'autres tâches, par la mise en œuvre de petites actions ponctuelles ou par la remise en question de la conception, sont relativement faciles à éviter. "*les gaspillages sont les effets secondaires souvent mal compris de choix techniques apparemment raisonnables*" [Bal12].

Philosophie

Sur base de ses observations, Ohno réfléchit à une méthode tentant d'évincer toutes ces sources de gaspillage. La philosophie *lean* cherche à produire au plus juste, à produire

exactement ce qui sera vendu. Cet idéal de production porte le nom de *Just-In-Time*. Ce principe consiste non seulement à éviter que le produit ne stagne entre la fabrication et la consommation mais aussi que ce dernier transite au sein de la chaîne de manière fluide et sans interruption entre deux processus.

L'important taux de stockage généré dans un système de flux poussé protège la production des arrêts éventuelles de la totalité de la chaîne suite à une panne rencontrée sur un processus, protection inexistante du côté du JIT.

Afin d'éviter le désagrément sus-mentionné sur une chaîne *lean*, le premier grand principe de cette nouvelle philosophie est complété par un second, le *jidoka*. Ce terme japonais rappelle le fait que, pour produire en flux continu, il est important qu'aucun processus ne connaisse de panne afin d'éviter de retarder l'entièreté de la chaîne. De même, un produit défectueux risque d'occasionner l'arrêt du processus et donc de la chaîne entière. Ohno et Ballé évoque à cet égard l'intérêt d'éviter de réaliser des pièces défectueuses et de prendre le réflexe "*d'arrêter la production plutôt que de produire des pièces insatisfaisantes*" [Bal04] de manière à éviter que le problème se propage et prenne de l'ampleur au fur et à mesure de la ligne de production [Ohn78, Bal04]. "*La qualité du produit au niveau de chaque processus est donc un pilier de la méthode lean*" [Bed11].

"Une ligne de production qui ne s'arrête jamais est, soit une ligne merveilleusement parfaite, soit une ligne à problèmes. Dans ce dernier cas, le fait que la ligne ne s'arrête jamais signifie que les problèmes ne remontent jamais à la surface. C'est très mauvais. Il est essentiel d'agencer une ligne pour qu'elle puisse être arrêtée à tout moment si nécessaire. Cela permet de prévenir la génération de produits défectueux, de mobiliser le personnel le plus compétent pour faire progresser les choses et, finalement, tendre vers la ligne parfaite qui ne nécessite jamais d'arrêt", [Ohn78].

Ce deuxième principe préconise donc de passer plus de temps en amont de la production et lors de la conception dans l'espoir d'en gagner en aval de la ligne. "*Le lean, c'est préparer un maximum en bureau pour diminuer l'exécution. Une production bien pensée à l'avance ne peut être que plus rentable*" [Bed11]. Ballé énonce de son côté que "*l'idée fondamentale du lean ingénierie est de passer plus de temps en amont pour moins reconcevoir en aval - et donc dépenser, au global, moins d'heures d'ingénierie*" [Bal12]. "*En ingénierie, il s'agit essentiellement de moments d'apprentissage en amont pour éviter de faire des erreurs qui coûtent cher en aval*" [Bal12].

L'idéologie *lean* se base également sur un outil intéressant qui est le *kaizen*. Ce terme japonais, fusion de deux mots japonais "kai" et "zen" voulant respectivement dire "changement" et "bon", se traduit en français par "amélioration continue". L'amélioration continue d'un système productif est un processus itératif [RS03]. Ce concept se concrétise par de petites actions ponctuelles peu coûteuses menées quotidiennement incluant l'entièreté des intervenants de la chaîne de production dans la recherche permanente de

l'atteinte des objectifs (figure 2.3, page 12).

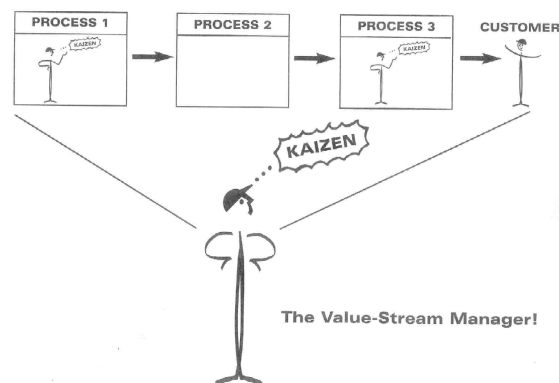


FIGURE 2.3 – Amélioration continue - Kaizen [RS03]

Le *kaizen* est à comparer avec l'innovation et le progrès qui constitue une amélioration que l'on pourrait qualifier d'"instantanée", comme l'illustre la figure 2.4, à la page 12.

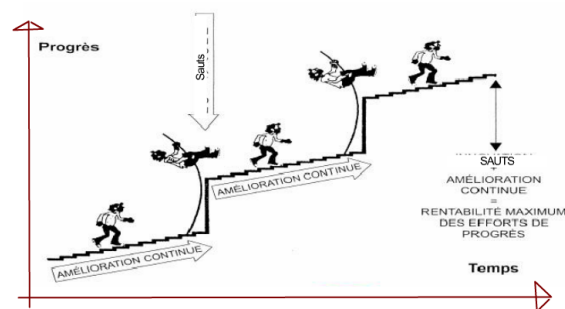


FIGURE 2.4 – Amélioration continue vs. Innovation [Bed11]

Méthode

Selon Womack et Jones, appliquer les principes *lean* à une production comporte 5 étapes incontournables [WJ09].

1 Spécifier la valeur : Il faut comprendre le consommateur et connaître ses exigences afin de cibler le mieux possible la valeur pour laquelle le client est prêt à payer.

2 Cartographier le flux de valeur : Il faut réaliser une cartographie des flux de valeur⁴ de l'état courant de l'entreprise. Cette étape consiste essentiellement à repérer

4. Value Stream Mapping - VSM.

les sources de gaspillage au sein de la production et d'envisager les pistes pour contrer ce gaspillage. Cet outil sera décrit au point 2.4, à la page 27.

3 Obtenir un flux de valeur : Cette étape consiste à mettre en œuvre les améliorations nécessaires pour réaliser un flux continu de travail sur la chaîne et à synchroniser tous les processus de production. Il est important de voir la production dans son ensemble et d'optimiser cette dernière globalement et de ne pas s'attarder sur l'amélioration des processus individuellement.

4 Créer un flux tiré : L'information sur ce qui doit être produit doit venir du client exprimant ses desiderata en aval de la production. Ce sont ces informations qui rythment la production. Alors que les produits en cours de modification descendent la chaîne de production, l'information conditionnant le rythme de la production remonte la chaîne, comme le montre la figure 2.5, page 13. C'est ce qu'on appelle un flux de production tiré, contrairement au traditionnel flux de production poussé [RS03].

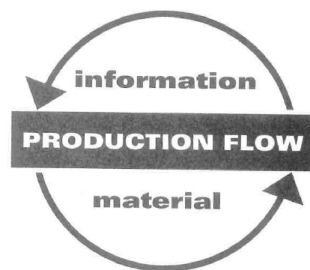


FIGURE 2.5 – Production selon un flux tiré [RS03]

De même, au sein de la production, chaque processus doit être vu comme le client du processus directement en amont et le fournisseur du processus directement en aval. C'est le processus aval qui conditionne la cadence de production du processus amont. Ce dernier doit produire et fournir au processus aval uniquement ce dont ce dernier a besoin et quand il en a besoin. Cette vision de l'enchaînement des processus est illustrée sur la figure 2.6, à la page 14.

5 Fiabiliser la production : La production au plus juste prônée par le *lean* ambitionne de diminuer au maximum le taux de stockage entre chaque processus. En cas de panne de l'un des processus ou de la défektivité d'un produit en cours de transformation, une variabilité de cadence au sein de la production risque d'apparaître. Afin de diminuer au maximum l'amplitude de cette variabilité de production, il est important de fiabiliser au maximum chacun des processus tant au niveau de leur ergonomie que de la valeur qu'ils ajoutent au produit.

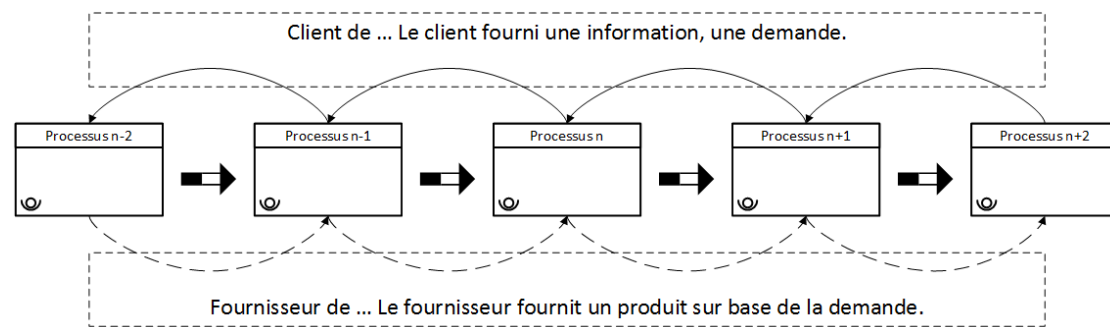


FIGURE 2.6 – Rôle de chaque processus

D'autre part, une attention particulière de la qualité de la transmission de l'information est requise afin d'éviter cette variabilité de production.

Moyens d'amélioration

La méthode d'application de *lean* à une ligne de production préconise dans un premier temps de réaliser *la cartographie des flux de valeur*. Cet outil, largement décrit dans la section 2.4, à la page 27, est une représentation schématique de la succession des processus d'une chaîne de production. Elle illustre également les zones de stockage sur la ligne et elle reprend aussi toutes les données relatives à la productivité de chaque processus.

Selon la littérature, deux moyens d'actions sont envisageables pour optimiser le flux de travail et faire tendre une quelconque production vers un système *lean* :

- En intervenant sur la chaîne de production et l'agencement des processus directement,
- En intervenant sur la transmission de l'information via un contrôle de la gestion de flux fiable.

Intervention sur la production Les systèmes productifs traditionnels sont des systèmes assez rigides, en termes de réponse à l'évolution de la demande du client, de par l'importance des unités de production qui transitent sur la chaîne. De manière à optimiser les déplacements de produits et de "*noyer les temps de démarrage et de réglage*" des machines sur une importante série de produits [Jal04], le premier réflexe des industriels est en général d'augmenter la taille des lots de produits manutentionnés d'un côté à l'autre de la ligne de production. Cependant, ces tailles importantes de lots ne favorisent pas une flexibilité appropriée à la fluctuation des demandes du client ce qui engendre des délais de production importants [DMR04, Ohn88, WJ09]. C'est pourquoi le *lean* préconise une production pièce par pièce, i.e, l'unité de production subissant une transformation

et transitant entre les processus doit être la plus petite possible de manière à obtenir une flexibilité appropriée pour pouvoir répondre à la demande du client dans les plus brefs délais. De la même manière, si une entreprise fabrique deux styles de produits (A et B), le *lean* recommande que la production des deux produits soit alternée de manière à ce qu'autant de produits A et de produits B sortent ensemble de l'usine [RS03]. Cette alternance de production est illustrée sur la figure 2.7, à la page 15.

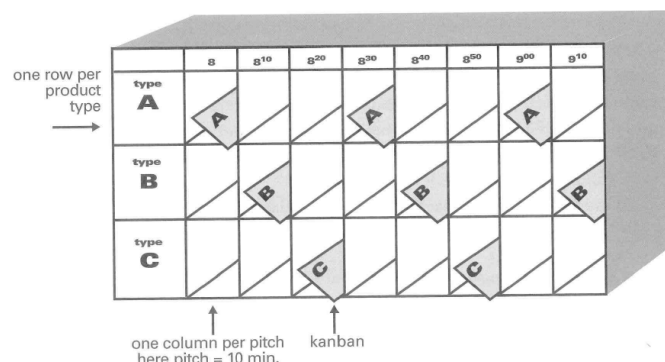


FIGURE 2.7 – Alternance de production [RS03]

D'autre part, une approche japonaise visant à l'amélioration continue des processus au sein d'une chaîne de production, initialement mise au point par le système de production Toyota, aide à créer un environnement de travail propre et organisé en adéquation avec l'optique *lean* [Bal99]. Cette méthode appelée la méthode des 5S ou *Five-Step plan* comporte 5 étapes. Chaque étape, dont le terme japonais commence par S⁵ désigne une opération concrète à mener sur chaque poste de travail en vue d'optimiser le processus étudié. Ces étapes sont les suivantes :

1. *Seiri* (Déblayer) : Cette étape consiste à débarrasser de l'espace de travail tout ce qui est inutile au travail.
2. *Seiton* (Ordonner) : Cette étape consiste à organiser et à ordonner le poste de travail de manière rationnelle afin d'optimiser le flux de travail. Elle vise à définir les emplacements de rangement de manière fiable afin d'éviter de perdre du temps dans la recherche d'un outil par exemple.
3. *Seiso* (Nettoyer) : Cette étape vise à améliorer l'état de propreté du poste de travail. Tout les déchets pouvant entraver le flux de travail doivent être retirés immédiatement du poste de l'opérateur. Les outils et les équipements doivent être nettoyer de manière régulière. Une gestion des déchets doit être mise en place.
4. *Seiketsu* (Propreté personnelle) : Cette étape a pour objectif de standardiser les emplacements des outils, des documents techniques, des matériaux, etc. avec un code couleur par exemple. Cette étape est plutôt d'ordre préventive.

5. Ce qui explique le nom de la méthode 5S.

5. *Shitsuke* (Discipline) : Cette étape rappelle que la discipline et la rigueur sont de mise pour optimiser le flux de travail. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire que le personnel ouvrier soit encouragé et que son travail soit reconnu.

En ce qui concerne l'optimisation du flux de production, Ballard et Howell mettent en évidence l'importance de stabiliser ce dernier avant de tenter d'améliorer les opérations du processus de fabrication visant à revoir la conception de toute la chaîne de production [HB94a].

Intervention sur la gestion des flux d'informations Un système de gestion de flux de l'information pensé et mis au point par Ohno, et largement exploité par les entreprises japonaises suite à l'hégémonie du TPS, est le système *kanban* ("étiquette" en français). Le système *kanban* représente un système simple et fiable et ne nécessite pas de moyens technologiques considérables. Le principe de ce système se base globalement sur une transmission d'étiquettes des processus aval vers les processus amont, chaque étiquette matérialisant une demande de la part du processus aval pour informer le processus amont qu'il est prêt à recevoir un produit. Le fonctionnement du système sera expliqué plus précisément au point 2.4, à la page 27. Ce système s'inscrit clairement dans la logique du flux tiré et de la remontée de l'information depuis l'aval de la ligne de production jusqu'à l'amont de celle-ci.

Par ailleurs, il est clair que la fiabilité absolue des processus de production est tout simplement impossible réellement. Un arrêt dans un processus suite à une panne ou à la constatation d'un produit défectueux n'est pas impossible. Il est donc nécessaire de pouvoir intervenir sur le processus défectueux dans les plus brefs délais. Un outil industriel et visuel simple mis au point par l'industrie japonaise est le système *andon*⁶. Ce terme japonais caractérise "*un système d'alarme qui permet aux opérateurs de signaler qu'ils ont un problème lors du montage d'une pièce*" [Bal04]. Un simple panneau lumineux au dessus de chaque poste de travail permet d'informer rapidement le contre-maître responsable de la ligne de production en cas d'une anomalie dans le processus concerné. Le contre-maître ainsi que toutes autres personnes pouvant aider l'opérateur du processus défectueux peuvent donc accourir en vue de résoudre le problème le plus rapidement possible afin de pouvoir relancer le processus et de limiter l'accumulation d'en-cours entre les processus, ou pire, l'arrêt de l'entièreté de la ligne.

6. Terme japonais voulant dire "lumière où il faut aller" en français.

2.3 Domaine de la construction

Le domaine de la construction est réputé pour être très complexe, pour accuser des délais importants et des retards récurrents. Le domaine de la construction, contrairement au domaine industriel, est un domaine dans lequel le *"processus de production n'est pas standardisé"* [Kub12] : les intervenants ne sont jamais les mêmes, les intérêts ne sont pas communs⁷, les compétences et les responsabilités sont différentes, les projets sont rarement identiques, etc. [Kub12]. De manière à améliorer la productivité de la construction, certains auteurs ont vu un intérêt d'étendre le concept du *lean* à ce domaine de manière à fluidifier les projets de construction.

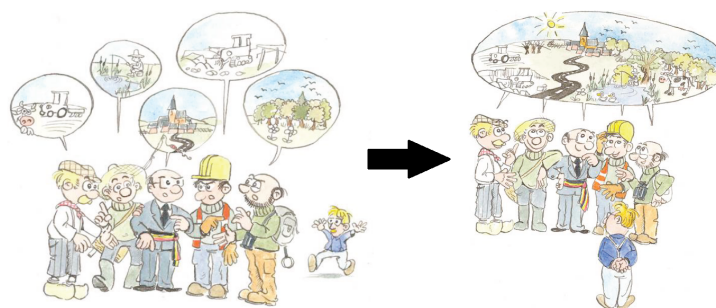


FIGURE 2.8 – Diversité des acteurs dans un projet de grande envergure [Kub12]

Le domaine de la construction rejoint celui de la production industrielle en ce qui concerne les objectifs visés par chacun. En effet, selon la définition : *"Un projet est une articulation de ressources intellectuelles, humaines et matérielles agencées dans une organisation temporaire dans le but d'atteindre un objectif caractérisé par un coût, un délai et des performances"* [Kub12], le projet de construction cherche à joindre *"l'incontournable compromis"* entre les 3 pôles **Qualité - Coût - Délai** [Kub12], tout comme l'industrialisation.

D'autre part, les ressources mises en jeu par chaque domaine sont identiques et le but de chacun est de tenter de diminuer au maximum ces ressources investies et d'obtenir le meilleur résultat possible, tant quantitatif que qualitatif. Chaque domaine cherche donc à optimiser sa productivité, comme le suggère l'équation 2.1, à la page 8.

2.3.1 Vision traditionnelle

La littérature fait mention à plusieurs reprises du fait que le domaine de la construction accuse une faible productivité et une maigre performance comparé au secteur de la production industrielle à cause des nombreuses sources de gaspillages décelées sur

7. Figure 2.8, page 17.

chantier [ARWYWL12].

Il apparaît que, suivant de nombreuses études menées dans le domaine de la construction, uniquement 40 à 60% des heures de travail sont consommées pour les tâches constructives, ce qui revient à dire que 40 à 60% des heures de travail prestées ne sont pas productives. Les raisons de cette perte de productivité sont essentiellement la mauvaise communication, les temps d'attente avant d'avoir les autorisations pour intervenir sur chantier, les temps d'attente pour obtenir les ressources matérielles et humaines, les erreurs de construction, les accidents sur chantier, les retards et les erreurs dans les rapports de chantier, les manquements de supervision ainsi que les défauts de planification [FA10]. De plus, le manque de compétence de certains corps de métier ainsi que les défauts initiaux dans les matériaux sont également sujets à de nombreuses critiques en termes de productivité. En général, on a tendance à dire que les sources de gaspillage sur les chantiers sont uniquement dues aux défauts dans les matériaux et non aux processus n'ajoutant pas de valeur à la construction [ARWYWL12]. Cependant, un tiers de ces gaspillages sont dus au système de management du chantier. De nombreuses études montrent que le profit nette d'une entreprise s'élève à seulement 2 à 3% du montant du projet [FA10].

Selon une étude menée à propos de la mesure de la productivité des ouvriers sur chantier, la répartition typique du temps des ouvriers passé sur le terrain serait celle reprise sur la figure 2.9, à la page 18. On peut y voir que uniquement 1/3 du temps est réellement consacré au travail. On peut voir de plus que quasiment 1/3 du temps est perdu dans l'attente. Le dernier tiers du temps total passé sur chantier est destiné aux déplacements, aux instructions, aux pauses, etc.

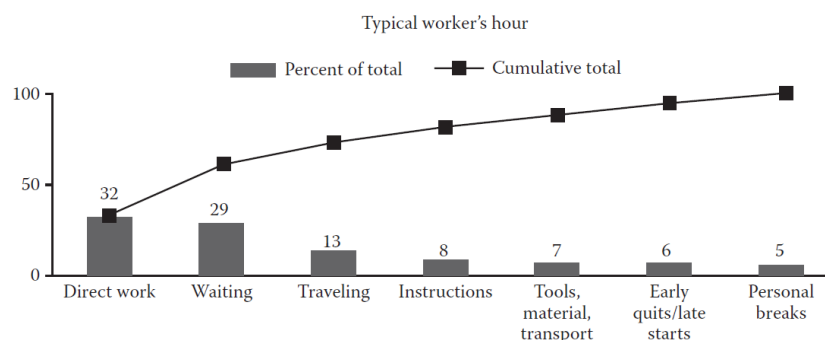


FIGURE 2.9 – Utilisation du temps par les ouvriers [FA10]

Une des sources importantes de gaspillage sur un chantier est le déplacement et la manutention interne au chantier [ARWYWL12]. A titre d'exemple, on peut citer la grue sur laquelle les entrepreneurs comptent trop souvent pour manutentionner les matériaux sur chantier sans s'être soucier au préalable de la quantité d'énergie consommée et du temps perdu en termes de manutention. La grue est un élément représentatif du manque de connaissance préliminaire de la manière dont une construction va se dérouler. Le layout

fiable et optimisé du site semble donc être une piste d'amélioration à apporter à propos des déplacements superflus des ressources sur le chantier [ARWYWL12].

Également, le secteur de la construction est un domaine extrêmement conservateur et ne connaît pas de grandes innovations. Les trois grandes causes qui vont à l'encontre de l'innovation dans le secteur de la construction, selon Lauri Koskela [KV01], sont :

1. Les théories de production, tout comme les théories de la construction, sont implicites. Le transfert d'une théorie d'un domaine à l'autre semble dès lors fastidieux,
2. Le modèle théorique régissant la construction est basé sur un modèle de transformation de production. Ceci génère une gestion fragmentée et myope de la construction dans laquelle l'interdépendance entre les différents intervenants n'existe pas en terme de productivité, générant une importante variabilité dans l'état d'avancement d'un chantier,
3. Finalement, les remontées d'idées d'innovations⁸, du terrain vers les concepteurs, visant à pallier aux problèmes, sont fortement entravées par la théorie implicite traditionnelle du domaine de la construction.

Planification

Un outil visant à tenter de limiter la variabilité dans un projet de construction composé d'une succession de nombreuses tâches successives est la planification. Cet outil spécifie ce qui doit être fait, avec quelles ressources, tant humaines que matérielles, et quand ça doit être fait. Un planning est réalisé habituellement sous forme d'un tableau à double entrée reprenant, verticalement, les tâches à effectuer et, horizontalement, une ligne du temps dont les unités sont relatives à l'importance du projet. Ce style de réalisation, appelé *planning Gantt*, est dû à Henry Laurence Gantt, ingénieur mécanicien et consultant en management, disciple du célèbre ingénieur et économiste américain Frederick Winslow Taylor [Wil03, KR12].

Certaines tâches du planning peuvent se dérouler en parallèle, d'autres, pour certaines raisons techniques, doivent se dérouler en série. Par exemple, il semble évident que la réalisation des fondations d'un bâtiment doit être achevée avant l'érection d'un mur de blocs ou de colonnes en béton. Les liens entre les deux tâches différentes sont réalisés selon que les tâches doivent commencer en même temps, doivent finir en même temps ou que la seconde doit commencer après la première [KR12].

De cette manière, il est facile de visualiser l'enchaînement des différentes tâches et les retards éventuels du chantier [KR12].

Visualiser le retard sur l'ensemble du chantier est possible en se référant au chemin

8. plus connues sous le terme anglais *Bottom-Up*.

critique du planning. Le chemin critique est "le chemin le plus long de l'origine du réseau à sa fin. Il peut éventuellement y avoir plusieurs chemins critiques. C'est le chemin critique qui définit la durée totale du projet" [KR12]. Il est visible en rouge sur l'exemple de la figure 2.10 à la page 20. Les tâches du chemin critiques ne peuvent pas connaître de retard sans retarder la totalité du chantier et les tâches sous-jacentes [FA10].

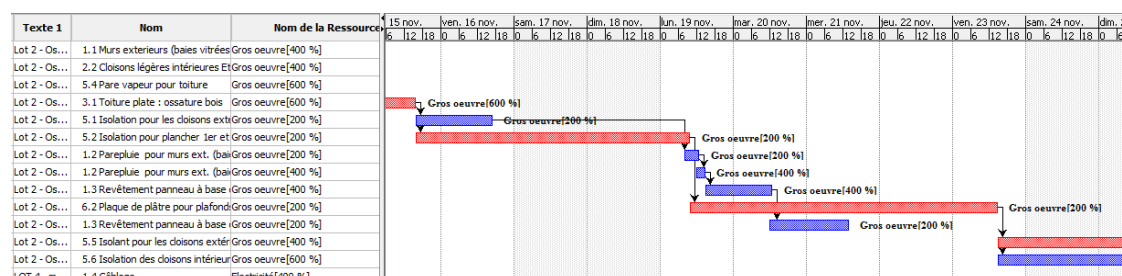


FIGURE 2.10 – Exemple de planning de Gantt appliqué à la construction d'un bâtiment de bureaux en structure bois [CVFH12]

Dans la construction traditionnelle, la gestion de la construction s'appuie exclusivement sur l'expérience de l'entrepreneur. Les tâches principales du chantier sont planifiées lors de la soumission de l'entrepreneur qui se base sur des rendements moyens issus de chantiers antérieurs. Ces tables de rendement ne sont pas fiables à 100% mais ont été jusqu'à présent utilisées dans l'élaboration de nombreux projets [FA10].

Chargement

Il est cependant courant de voir que les gestionnaires de projets assignent des horaires de travail dépassant la capacité des équipes espérant que la pression ainsi engendrée rende les ouvriers plus rentables. Or, il a été montré dans des études que dans des projets gérés de manière traditionnelle, seulement la moitié des tâches hebdomadaires prévues sont généralement effectuées sur cette semaine. Deux chercheurs renommés dans le domaine du *lean*, Glenn Ballard et Greg Howell, ont repris dans un ouvrage des données de mesure à propos de la variabilité des flux de travail montrant un taux d'échec à propos du respect du planning de 54 %. Dans de telles conditions de planification, les auteurs mentionnent également qu'il n'est pas rare de constater que la quantité de travail réellement réalisée sur le temps imparti vaut 30 à 60% de la quantité de travail prévu, ce qui correspond à une performance industrielle faible [FA10].

Non-complétion des tâches

Il apparait que la majorité des raisons de non-complétion des tâches concerne une mauvaise planification [FA10, HB94c], une mauvaise coordination et un travail antérieur

inapproprié comme l'illustre la figure 2.11, à la page 21. Ce graphique met clairement en évidence tout l'intérêt d'une planification et d'une coordination de qualité. Les tâches non effectuées sont analysées afin de pouvoir définir les sources des problèmes rencontrés et les conséquences que ces derniers auront sur la suite du chantier. Il est important de comprendre ces sources de problèmes afin d'éviter de réitérer les erreurs du passé [FA10].

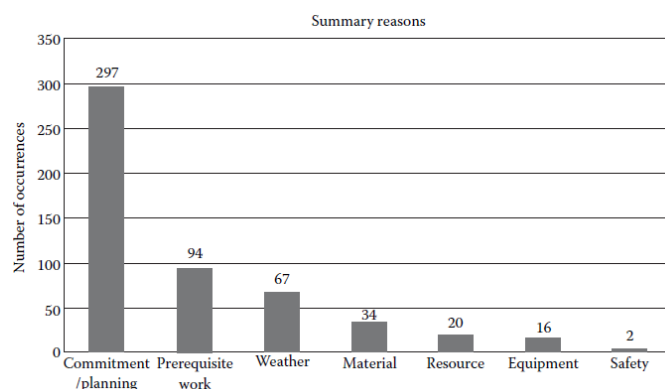


FIGURE 2.11 – Distinction des raisons de non-complétion de tâches [FA10]

Par ailleurs, il apparaît, selon [Bal99], que la principale cause de non-complétion des tâches sur les chantiers actuels est le manque de rigueur dans l'application de la comparaison du résultat obtenu avec les critères de qualité ainsi que la répétition des erreurs de production due à la mauvaise compréhension des causes des problèmes en présences.

De plus, selon [Bal99], Ballard dénonce que la plupart des travailleurs hésitent à refuser les tâches mal définies et/ou les tâches préalablement réalisées ne rencontrant pas les critères de qualité définis initialement de peur que ce refus ne retarde le chantier.

2.3.2 Lean Construction

Lauri Koskela, professeur de la théorie de *lean project* de l'Université de Salford est l'un des précurseurs du *lean construction*. Il a tenté de transférer les principes organisationnels industriels *lean* au domaine de la construction [ARWYWL12]. Il a également tenté de cibler les sources de gaspillage dans la construction. Il a réalisé de plus une étude bibliométrique à propos de l'apparition du terme *production waste* dans la littérature à partir de 1840 [KSR12].

Appliquer le *lean* à la construction consiste à mettre en place un flux de travail à travers des processus de construction. Sur un chantier, on n'a pas un produit standard qui s'écoule dans une usine, on a un avancement. Par exemple, chaque pièce d'un bâtiment constitue une unité. On a donc plutôt un flux de travail dans la construction (de 0 à

100%) et non un flux de matière. Dans la construction, les unités de production sont immobiles tandis qu'en usine, les unités de production sont, pour la plupart, mobiles. Quand les corps de métier interviennent sur le chantier, il y a de la valeur ajoutée. Par contre, quand le chantier est à l'arrêt (pause, manque de matériaux, problème et mise à l'arrêt du chantier), il n'y a pas de valeur ajoutée.

La variabilité dans le flux de travail engendre souvent d'importants temps de cycle et une diminution de la productivité due à l'introduction de gaspillage dans les processus de construction. Une des voies du *lean construction* est de réduire la variabilité dans ce qui est produit (les outputs) et de réduire les tâches qui n'ajoutent pas de valeur dans les processus de production [FA10]. Les sources de gaspillage en construction sont les mêmes qu'en production industrielle (section 2.2.2).

Last Planner® System

Selon Ballard, la planification n'est pas un travail facile. Il est bien plus facile de réagir à des difficultés que de tenter de les prévoir [Bal99].

Par ailleurs, Ballard et Howell dénoncent le fait que la planification d'un système traditionnel ne se base que sur ce qui devrait être fait sans se soucier de l'état d'avancement des tâches précédentes en cours de chantier [HB94c].

De manière à anticiper les difficultés générées par une planification traditionnelle, Ballard développe en 1992 une méthode de planification appelée le *Last Planner® System*⁹ tenant compte à la fois de ce qui devrait être fait et ce qui peut être fait sur base de l'état d'avancement du chantier [HB94c]. Étant donné leur contact direct avec le chantier, les ouvriers et les contremaîtres ont une meilleure idée du rythme auquel le travail avance et auquel il pourrait avancer, sur base des capacités de chacun et des difficultés rencontrées, que les concepteurs du projet. C'est donc le dernier maillon de la chaîne hiérarchique qui dirige la planification des travaux tout en faisant connaître l'état d'avancement du chantier en faisant remonter l'information jusqu'au programmeur. Le LPS gère ainsi de manière efficace la variabilité du flux de travail car il se base sur une planification à court terme [FA10].

Le LPS est basé sur une méthode subdivisée en 3 à 4 niveaux illustrée à la figure 2.12, à la page 24.

1. Le "**Master Schedule**" (le "calendrier maître") montre une vue d'ensemble des principales phases du projet sur base des informations préliminaires insérées dans les documents contractuels. De manière traditionnelle, ce calendrier est généralement inclus dans la soumission de l'entrepreneur. Une des manières de réaliser ce

9. LPS

Master Schedule est d'avoir recours à une représentation de Gantt. Un métré approximatif est déjà réalisé à cette étape là. Il est principalement préparé par des personnes qui ne feront pas le travail.

2. Le "**Look-Ahead Schedule**" (le "calendrier prévisionnel") se base sur le *Master Schedule* et donne la planification des tâches qui devraient être faites (SHOULD) sur un délais de 6 à 8 semaines. Il est nécessaire au contrôle du flux de travail.
3. Basé sur le *Look-Ahead Schedule*, le "**Weekly Work Plan**" (le "calendrier de travail hebdomadaire") spécifie les transferts de travail entre chaque corps de métier. Actualisé par les derniers planificateurs qui mentionnent ce qui peut être fait (CAN) étant donné l'état d'avancement du chantier. Ce planning hebdomadaire reprend les tâches qui seront (WILL) faites. Lors de la planification du *Weekly-Work Plan*, il est recommandé de se baser sur un rendement s'élevant à 75% de la capacité des ouvriers afin d'éviter les retards [FA10].
4. Dans le cas de certains projets, tels que les "EPC construction"¹⁰ qui représentent des projets dans lesquels l'entrepreneur s'engage dans la conception, la fourniture de matériaux et la mise en œuvre sur chantier, il est nécessaire que le planning soit d'un niveau de détail important afin d'éviter toute variabilité de résultats engendrant des conséquences financières déplaisantes. Le très détaillé "**Daily Work Plan**" (le "calendrier de travail journalier") prend alors tout son sens dans de tels cas.
5. Enfin, une analyse qualitative et quantitative des résultats en comparant ce qui devait être fait (WILL) et ce qui a été fait (DID) est réalisée en profondeur pour tenter de comprendre les raisons de non-complétion de certaines tâches afin d'éviter de commettre les mêmes erreurs ultérieurement et pour améliorer le système futur. Le *Percentage of Projects Complete*¹¹ est calculé pour la semaine de travail.

Cette planification est un processus itératif s'inscrivant intégralement dans une démarche d'amélioration continue.

On voit ici l'intérêt du LPS par rapport à la planification traditionnelle. Dans le dernier cas, la tâche suivante ne commence que lorsque la tâche précédente est terminée. Dans le LPS, la tâche suivante ne débute que lorsque tous les facteurs conditionnant la réussite du processus sont réunis (ressources disponibles, méthode et finalisation de la tâche précédente)[FA10, HB94c]. L'utilisation de POST-IT ou de tableaux blancs s'avère être très utile dans cette organisation nécessitant des remises à jour de planification fréquentes (figure 2.13, page 24).

10. *Engineering, Procurement and Construction*

11. PPC.

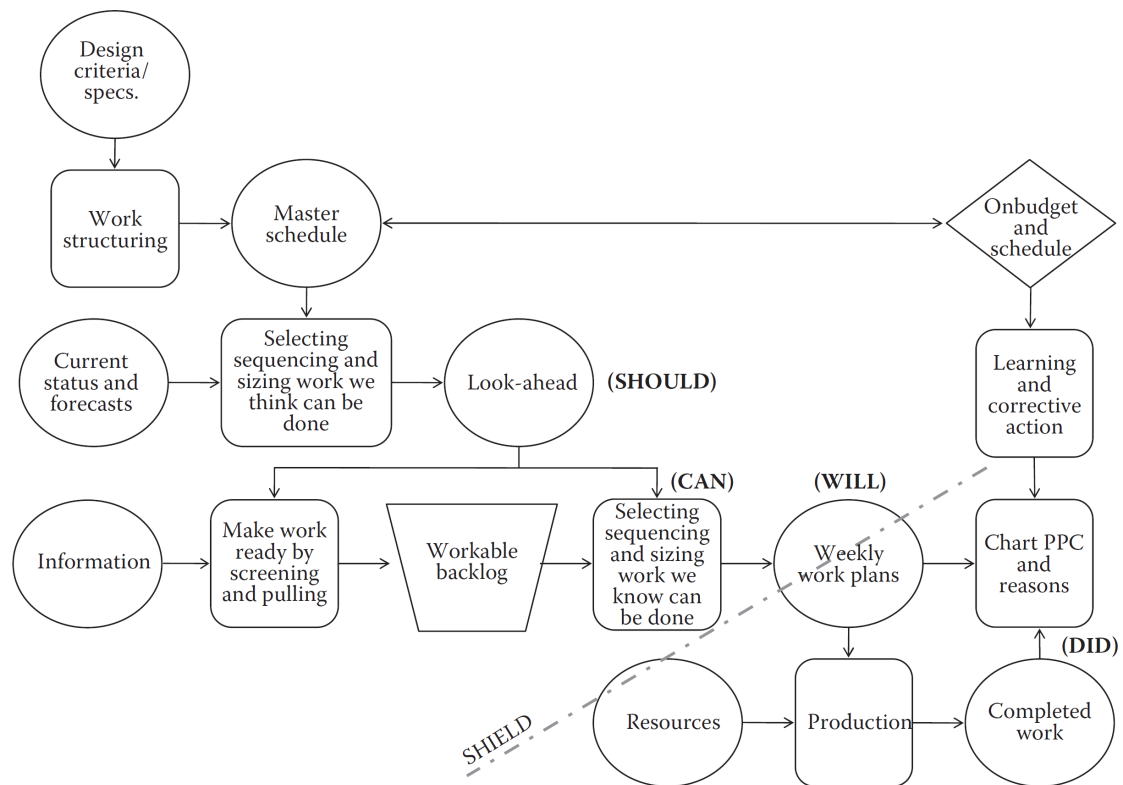
FIGURE 2.12 – Flux de travail dans le *Last Planner® System* [FA10]

FIGURE 2.13 – Réunion de chantier basée sur le LPS [FA10]

Percentage of Projects Complete - PPC

Le LPS revendique une évaluation hebdomadaire de l'état d'avancement du chantier et une analyse des raisons de non-complétion des tâches. Les défauts relevés servent ensuite à améliorer la planification du travail de la semaine suivante. Repérer une source de gaspillage et éradiquer cette dernière s'inscrit clairement dans la démarche *lean* [FA10].

Un des outils clé du LPS permettant de mesurer l'état d'avancement du chantier par rapport à ce qui a été planifié est le *Percentage of Projects Complete*. Cet outil détermine le pourcentage des tâches planifiées réellement effectuées sur la journée de travail (équation 2.3, à la page 25). Le *Rolled PPC*, calculé sur plusieurs jours, est défini comme étant le produit des PPC journaliers. Il prend en compte l'accumulation des tâches au fil des jours qui sont réalisées sur un même produit [FA10]. Le *Rolled PPC* semble être un outil de mesure plus performant pour mettre en évidence les déficiences dans la planification. Un exemple de calcul de PPC est illustré à la figure 2.14, à la page 25.

$$PPC = \frac{\text{Nombre de tâches réalisées sur une durée } x}{\text{Nombre de tâches planifiées sur une durée } x} \quad (2.3)$$

$$\text{Rolled PPC} = \prod_{i=1}^n PPC_i \quad (2.4)$$

Jour	1	2	3	4	5
Tâches planifiées	3	4	4	3	4
Tâches réalisées	2	2	2	2	3
PPC	67%	50%	50%	67%	75%
"Rolled" PPC	67%	33%	17%	11%	8%

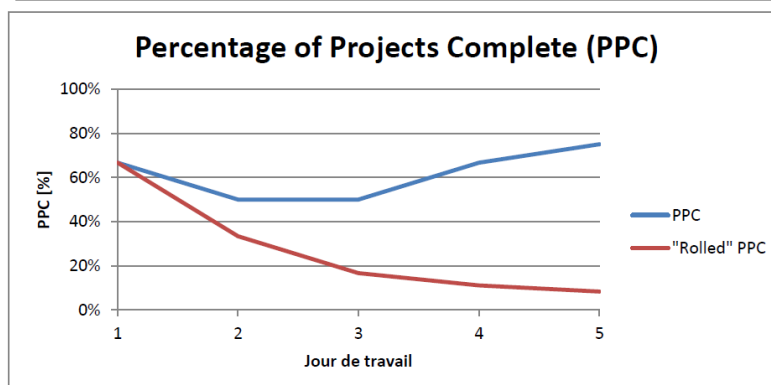


FIGURE 2.14 – Percentage of Projects Complete - PPC

La variation du PPC peut être due soit à un déséquilibre charge-capacité du processus¹², soit à un défaut du processus suite à un incident ou à une mauvaise planification.

Le *lean construction* vise à éviter de telles variations dans la réalisation de travaux, ou du moins d'y répondre [HB94b], afin que les équipes de travail en aval ne souffrent pas

12. Si la capacité est plus grande que la charge, on est en surproduction (surcharge), si la capacité est plus petite que la charge, on est en sous-production (sous-charge) [Bed11].

du retard des équipes en amont. Un retard imposé à une équipe disponible occasionne un gaspillage de temps et d'argent [FA10].

Le calcul du PPC sert de base à la détermination des raisons de non-complétion d'une tâche.

Five-Why

La méthode des *Five-Why*¹³ est également un outil du LPS et consiste à analyser chaque problème de non-complétion des tâches planifiées. Se poser la question "Pourquoi ce problème est-il arrivé ?" une seule fois permet de découvrir une cause directe du problème étudié. Mais il s'avère que cette cause représente rarement la raison initiale de non-complétion d'une tâche. Se poser 5 fois la question "Pourquoi ?" et répondre à chaque fois permet de dénicher la source du problème et de la corriger. Si cette procédure n'est pas menée à bien, le problème sera récurrent et réapparaîtra ultérieurement [Ohn88].

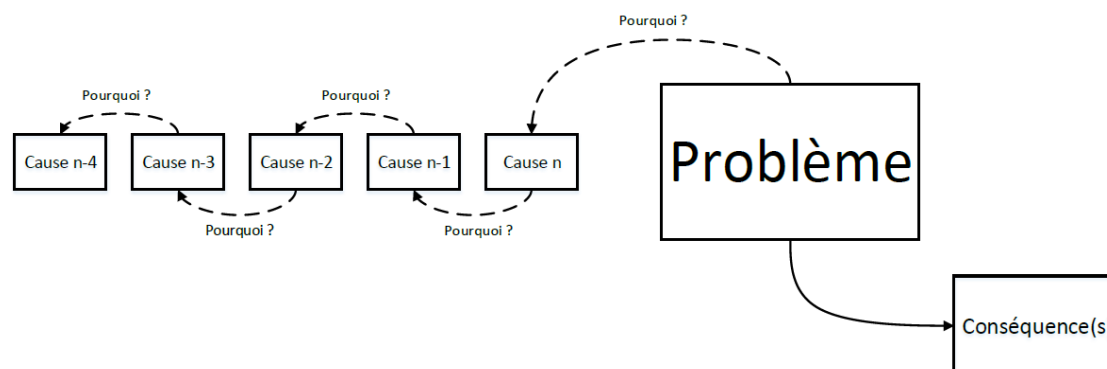


FIGURE 2.15 – 5-Pourquoi ?

Suite à l'identification du problème, il est nécessaire de prendre des mesures correctives et non curatives afin d'éradiquer complètement le problème et d'éviter qu'il ne réapparaisse ultérieurement. Il ne faut pas trouver des "rustines" pour cacher le problème [Bal04] mais le mettre bien en évidence pour pouvoir le corriger de la meilleure manière qu'il soit [Bed11]. L'exemple illustré sur la figure 2.16, à la page 27, démontre très bien ce concept. Le problème est ici une fuite d'eau. La mesure curative consistant à éviter l'inondation de la pièce en-dessous via l'utilisation d'un récipient n'éradique pas le problème. Éliminer totalement ce dernier peut être réalisé via le changement d'une tuile de la toiture. Il est donc important de bien définir un problème pour ne pas s'égarer dans la correction de ce dernier.

La méthode des 5S expliquée au point 2.2.2, à la page 15, reste d'application dans

13. 5-Pourquoi.

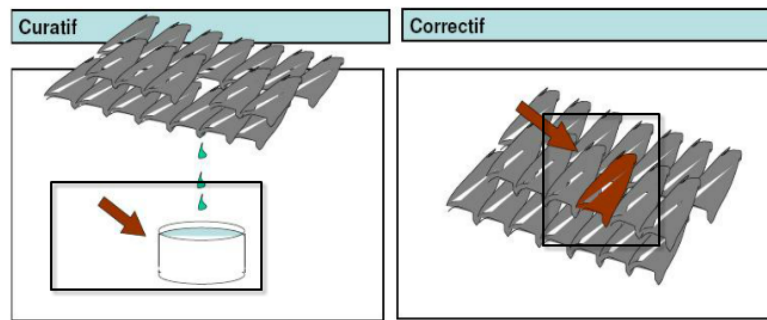


FIGURE 2.16 – Curatif-Correctif [Bed11]

le domaine de la construction. Un environnement de travail sain peut conduire à la résolution de bons nombres de problèmes sur chantier et évite de perdre du temps dans la recherche des outils nécessaires, des matériaux manquants, etc [Bal99]. *"Le 5S est au chantier ce que l'hygiène est au corps humain"* [Bed11].

2.4 Value Stream Mapping - Cartographie des flux de valeur

La cartographie de flux de valeur est une représentation visuelle du flux de production depuis la matière première jusqu'à la consommation du bien au travers de l'entreprise dans laquelle le bien de consommation a été réalisé. Une telle représentation est illustrée sur la figure 2.17, à la page 28.

Lors de son séjour dans l'entreprise, le bien a acquis de plus en plus de valeur, la valeur finale du bien étant en accord avec les exigences du client. La cartographie de flux de valeur met en avant les processus qui ajoutent de la valeur au produit (mise à forme, assemblage, etc.) et ceux qui n'en ajoutent pas (transport, stockage, en-cours, etc.) de manière à obtenir un layout complet de l'entreprise sans se focaliser sur un processus bien particulier [RS03].

" La "cartographie" consiste à représenter de façon simple, l'ensemble des procédés physiques et d'information, à valeur ajoutée ou sans valeur ajoutée, d'un bout à l'autre de l'usine." [Jal04]

L'important, selon [WJ09], ce n'est pas de réaliser une cartographie des flux de valeur à la perfection, mais de rendre le système industriel étudié le plus simple possible afin de pouvoir voir le flux de valeur et les défauts inhérents à la chaîne de production et de supprimer ensuite ceux-ci pour optimiser la chaîne.

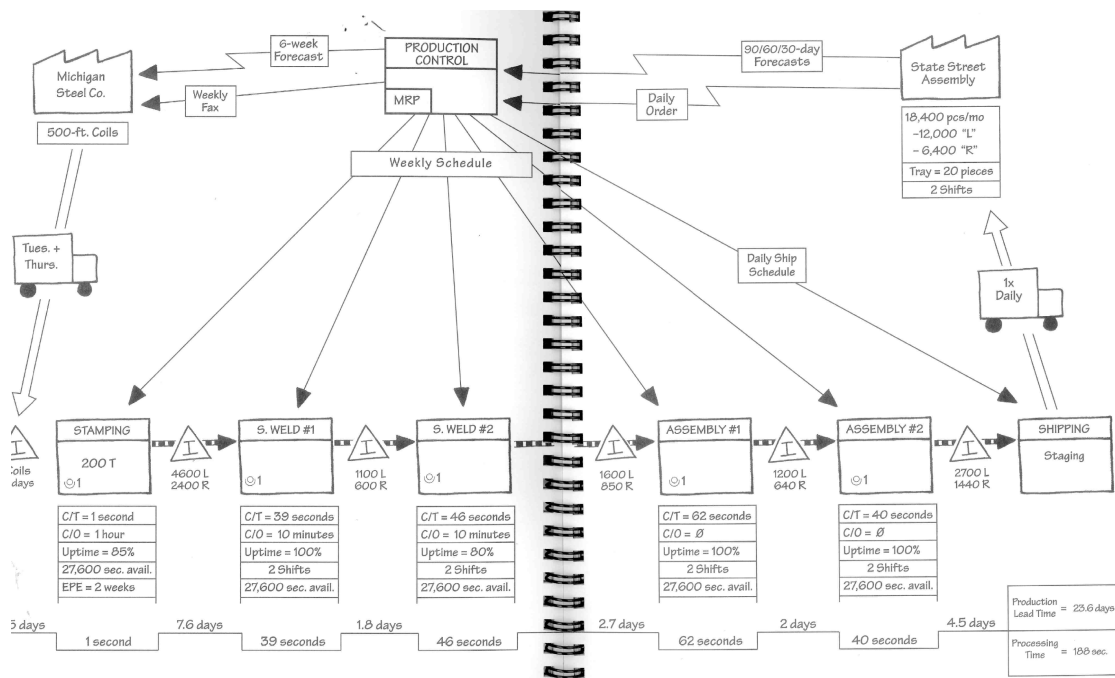


FIGURE 2.17 – Cartographie de flux de valeur - Symboles [RS03]

"Simplifier pour voir." [Jal04]

Réaliser une telle cartographie s'avère être une tâche très complexe. C'est pour cela qu'il est recommandé de partir d'une vue grossière du flux de la production d'un bien. La figure 2.18, page 28 schématise le point de départ de la cartographie. L'industrie est représentée dans un premier temps dans son contexte extérieur : l'approvisionnement en matières premières est inclus à gauche et la consommation du produit fini est inclus à droite. La consommation du bien peut se faire soit directement par le client, soit par une entreprise aval qui intervient sur le bien avant sa consommation finale par le client. Le produit devient dans ce dernier cas la matière première de la chaîne de production en aval de l'industrie étudiée.

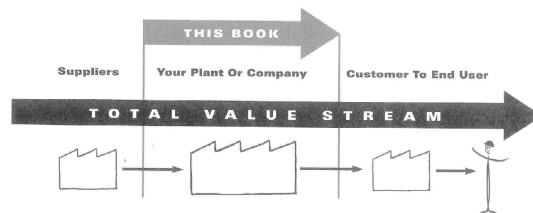


FIGURE 2.18 – Cartographie de flux de valeur - Première étape [RS03]

A partir de cette vue, la cartographie de flux de valeur peut alors progressivement se développer en réalisant des zooms successifs sur l'ensemble de la chaîne de production jusqu'au niveau de zoom désiré.

Un autre atout de la cartographie de flux de valeur est la vision des liens qui existent entre le flux de matière et le flux d'informations nécessaires à la production.

L'objectif de l'amélioration continue¹⁴ est de se baser sur cette représentation graphique actuelle de flux de valeur afin de proposer une optimisation de la production. La cartographie de l'état futur de la production pourra être effectuée après une phase d'analyse de l'état courant consistant à cibler et à éradiquer les processus n'ajoutant pas de valeur aux produits. Cet esprit s'inscrit complètement dans une démarche de production *lean* visant à rendre la production la plus continue possible.

Via l'information qu'elle véhicule, la cartographie de flux de valeur devient un outil de planification et de communication intéressant.

" La "cartographie du flux de valeur" est un outil de diagnostic, d'améliorations et de planification des améliorations mais aussi de communication."
[Jal04]

Tout au long de ce travail, l'unité de production sera définie comme étant le produit qui transite au sein des processus pour conserver un flux de production continu. Chaque entreprise déterminera la dimension de son unité. Pour un processus d'assemblage dans une entreprise automobile, cette unité sera peut être une voiture, tandis que l'unité dans une manufacture métallique sera peut être un lot de 10 poutres par exemple. Quoi qu'il en soit, l'unité doit être la plus petite possible pour corroborer avec les principes du *lean*.

2.4.1 Spécification de l'unité de production

Spécifier quel sera l'objet de l'étude semble nécessaire avant de commencer à s'attacher à la représentation graphique de la production. En effet, il faut déterminer quelle sera l'unité de production analysée. Une entreprise produit en général différents produits. Ces derniers ne passent peut être pas par les mêmes processus. Une analyse globale de la production ne peut donc être menée à bien si nous prenons en compte chaque produit indépendamment. C'est pour cela qu'il est nécessaire de grouper les produits qui subissent des traitements semblables, comme l'illustre la figure 2.19, à la page 30. Verticalement, les produits transformés dans l'entreprise sont listés. Horizontalement, les processus de transformation sont énumérés. Ainsi, e.g., si le produit de la ligne A subit le processus de la colonne 1, on met une croix dans la case correspondant à l'intersection de cette ligne et de cette colonne. De cette manière, il est aisé de repérer les produits subissant

14. Kaizen.

plus ou moins les mêmes processus de transformation et de les regrouper afin de créer une famille de produits qui deviendra l'unité de production.

	Assembly Steps & Equipment							
	1	2	3	4	5	6	7	8
PRODUCTS	A	X	X	X		X	X	
	B	X	X	X	X	X	X	
	C	X	X	X		X	X	X
	D		X	X	X		X	X
	E		X	X	X		X	X
	F	X		X		X	X	X
	G	X		X		X	X	X

FIGURE 2.19 – Matrice de produits [RS03]

2.4.2 Cartographie de l'état courant

Comme il est mentionné supra, il est indispensable de commencer par une représentation grossière du flux de travail au sein de l'entreprise comme le montre l'image 2.20 à la page 30.

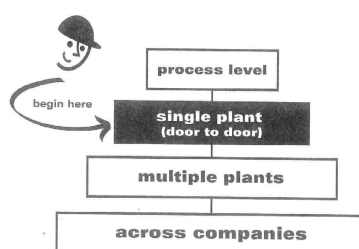


FIGURE 2.20 – Cartographie de flux de valeur - État courant [RS03]

Ensuite, selon les informations recherchées, il faut zoomer sur chaque processus pour obtenir plus de détails sur la production au sein de l'entreprise. Il est recommandé de commencer à représenter les processus le plus en aval possible et de remonter la chaîne de production. De cette manière, il sera plus facile de cibler déjà les processus qui pourront être modifiés en vue de réaliser une cartographie de l'état futur de la production [RS03].

Les symboles utilisés dans une représentation de cartographie de flux de valeur sont repris sur la figure 2.17, à la page 28, et leur explication est reprise dans le tableau 2.1, à la page 31.

Les triangles de stockage rappelant le signe attention traduisent le fait, qu'à cet endroit, le flux est stoppé. En réalité, un processus peut chaque fois être décomposé en



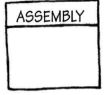

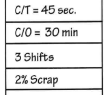



Symbole	Définition	Symbole	Définition
	Source extérieure		Transport
	Processus		Stockage
	Données numériques		Flux poussé
	Flèche vers consommation produit		Flux d'information

TABLE 2.1 – Symboles de la *Value Stream Mapping* [RS03]

sous-processus et stockages entre les sous-processus. Cette décomposition sera conditionnée par la précision souhaitée par la personne réalisant la cartographie. Il faut faire attention à ne pas rassembler trop de processus sous une seule bannière car certains stockages indésirables peuvent éventuellement se dissimuler entre ces processus et passer inaperçus lors de la réalisation de la carte. Il ne faut donc pas hésiter à représenter les sous-processus lorsque des risques d'accumulations entre ces deux sous-processus sont possibles.

Un autre symbole très important est le lien FIFO¹⁵. Ce dernier mentionne le fait que les produits semi-finis sortant du processus amont seront consommés par le processus aval dans l'ordre de sortie du processus amont. Ce lien est utilisé lorsque le stockage ne comporte pas tous les éléments du processus d'approvisionnement dans le cas où le nombre de versions de produits est important ou dans le cas où les produits sont de grande taille ou faits sur mesure. Ce lien est visible sur la figure 2.21, à la page 31.



FIGURE 2.21 – Lien FIFO [RS03]

L'évaluation de la carte des flux de valeur existante met en évidence les opportunités

15. First-In, First-Out.

d'amélioration des processus et d'élimination ou de réduction des étapes superflues. La future carte se base sur les observations réalisées sur la carte existante [FA10].

2.4.3 Indicateurs quantitatifs

Il est important de pouvoir prendre certaines mesures sur la ligne de production car "*il est impossible d'améliorer ce qui ne peut pas être mesuré*" [FA10].

Lead time - L/T. Le *lead time* est le temps total que prend une pièce pour passer au travers d'une série de processus, du début du premier processus à la fin du dernier processus. Le *lead time* se rapporte à un processus, à une série de processus ou à l'ensemble des processus compris au sein de l'entreprise. On parlera alors respectivement du *lead time* d'un processus¹⁶, du *lead time* pour parcourir plusieurs processus ou du *lead time* de la chaîne de production. Le *lead time* est propre à un produit, même s'il caractérise les processus au travers desquels le produit transite. Il est schématisé à la figure 2.22, page 32 [RS03].

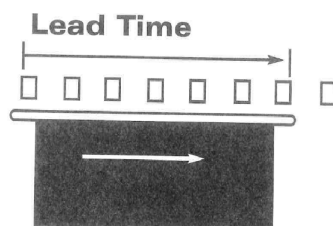


FIGURE 2.22 – Lead time [RS03]

Temps de cycle - Cycle time - C/T. Le temps de cycle est le laps de temps entre la finition d'une pièce et la finition de la pièce suivante. C'est le temps entre deux états identiques consécutifs du processus pendant la production. Il permet de déterminer le temps que prend une machine et les opérateurs associés pour réaliser une pièce et toutes les tâches qui n'ajoutent pas de valeur mais nécessaires pour accueillir la pièce suivante. Le temps de cycle est propre à un processus. Un schéma représentatif du temps de cycle est repris à la figure 2.23 à la page 33 [RS03].

Temps de création de valeur - Value Creating Time - VC/T. Le temps de création de valeur est la portion du temps de passage d'un bien à travers un processus lors duquel de la valeur est réellement ajoutée au produit. C'est ce temps qu'il faut réellement prendre en compte lors de l'analyse de la productivité d'une entreprise car

16. Ce qui correspond au temps de cycle.

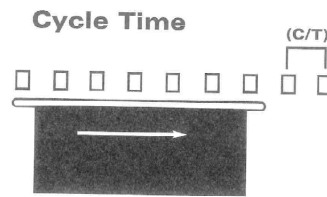


FIGURE 2.23 – Temps de cycle [RS03]

c'est le travail réalisé lors de ce laps de temps que le consommateur devrait réellement payer. Le temps de création de valeur est propre à un processus et au personnel assigné aux opérations de ce processus. Un schéma représentatif du temps de création de valeur est repris à la figure 2.24, à la page 33 [RS03].

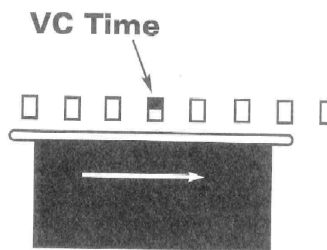


FIGURE 2.24 – Temps de création de valeur [RS03]

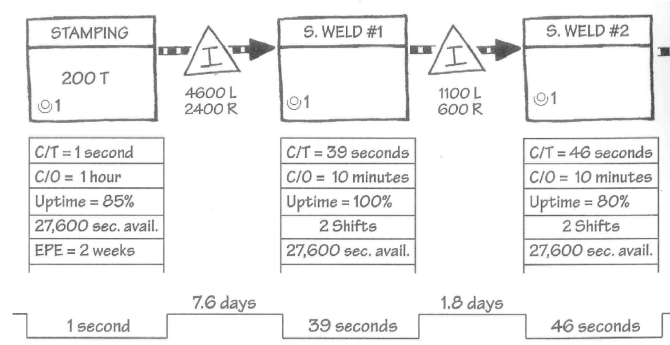
Dans tous les cas, il faut garder à l'esprit la règle importante reprise à l'équation 2.5, à la page 33.

$$\text{Temps de création de valeur} < \text{Temps de cycle} \leq \text{Lead time} \quad (2.5)$$

NB : Le signe " \leq " de l'inégalité ci-dessus n'est valable que lorsque le *lead time* correspond à un seul processus. Dans ce cas, il se confond avec le temps de cycle du processus.

Le plus important lors de l'optimisation d'un flux de production est le rapport entre le temps de création de valeur et le *lead time*. C'est ce rapport qui caractérise bien la productivité de l'entreprise. Sur la figure 2.25, à la page 34, nous pouvons apercevoir une ligne brisée¹⁷ sous l'enchaînement des processus et des stocks entre les processus d'un exemple de production de pièces mécaniques. La partie inférieure de la ligne reprend les temps de création de valeur (VC/T) tandis que la partie supérieure de la ligne brisée reprend les temps d'attente de stockage entre chaque processus.

17. *Timeline*.

FIGURE 2.25 – Comparaison *lead time* et temps de création de valeur [RS03]

Le rapport entre le temps de création de valeur et le *lead time* se calcule selon l'équation 2.6, à la page 34.

$$\text{Rapport} = \frac{\sum_{i=1}^n VCT_i}{\sum_{i=1}^n (VCT_i + L/T_{stocks,i})} \quad (2.6)$$

Takt time - TT Le *takt time* est le temps de production requis pour que le client soit servi dans les temps. C'est le temps moyen que devrait prendre un processus pour qu'il n'y ait pas de retard dans la production. Son expression est reprise à l'équation 2.7, à la page 34.

$$TT = \frac{\text{Temps total de production}}{\text{Nombre de pièces à réaliser}} \quad (2.7)$$

En réalité, l'amélioration continue prônée par le *lean* tend à lisser les temps de production au mieux et de faire tendre les temps de cycle de chaque processus vers le *takt time*¹⁸ afin d'obtenir un flux de production continu. De cette manière, la production sera parfaitement équilibrée et le produit sera livré dans les temps. Le *takt time* est le tempo de la production. Il représente "un but visible et mesurable" [Jal04].

$$VCT_i \longrightarrow TT \quad (2.8)$$

Comme l'illustre la partie gauche de la figure 2.2, à la page 9, quand les processus ne sont pas synchronisés, il y a un déséquilibre dans la production. Ce déséquilibre se marque par une accumulation d'en-cours entre un processus amont dont le temps de

18. Équation 2.8, à la page 34

cycle est faible et un processus aval dont le temps de cycle est important. Cette stagnation de produits semi-finis mobilise inutilement de l'espace de travail, éventuellement du personnel et des équipements. De manière plus générale, on peut dire que des ressources humaines et matérielles sont utilisées pour produire ce qui n'est pas nécessaire pour les processus avals.

C'est pourquoi il est important de synchroniser au mieux les processus successifs afin d'éviter les déviations obtenues supra. Pour tendre vers un flux continu de production, comme l'illustre la partie droite de la figure 2.2, à la page 9, il est parfois nécessaire, en vue du kaizen, de revoir l'arrangement de l'entreprise et la succession des tâches. Parfois il est nécessaire d'investir dans de nouvelles machines si les machines actuelles ont un temps de cycle plus important que le *takt time*.

La synchronisation parfaite de l'ensemble des processus d'une entreprise semblant quelque peu idéaliste, il est cependant tout à fait envisageable de synchroniser partiellement quelques processus successifs afin de diminuer l'ampleur des stocks entre les processus, comme nous pouvons le voir sur la figure 2.26, à la page 35.

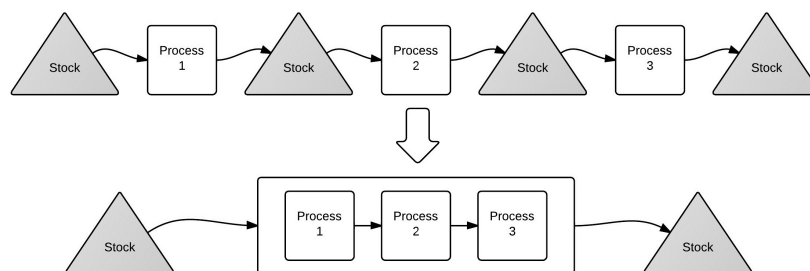


FIGURE 2.26 – Association de processus synchronisés

Changeover time. Dans une entreprise, rare sont les machines qui ne peuvent réaliser qu'une seule tâche. En général, les investissements actuels sont réalisés dans des machines complexes permettant de réaliser différentes tâches, ce qui nécessite parfois un certain temps de réglage des machines avant de lancer une production. Ce temps nécessaire aux réglages et à l'éventuel changement d'équipe se traduit par le *Changeover time*. Il est à prendre en compte lors de l'analyse de la production en vue d'optimiser cette dernière [RS03].

Temps de travail disponible. Pour analyser la production d'une entreprise, il est nécessaire de distinguer le temps de travail disponible du temps de travail total qu'offre une journée de travail. En effet, le personnel d'une entreprise travaille rarement 8 heures d'affilée sans pause. Du temps de travail total, il faut décompter les pauses prévues sur

la journée (matin, midi et après-midi), les breaks, les changements d'équipes, le temps lors duquel des instructions ou des clarifications sur la tâche à effectuer sont données, le laps de temps consacré au nettoyage des machines, etc. [RS03].

Taille des équipes. Une autre valeur numérique à recenser lors de la cartographie de flux de valeur est le nombre d'opérateurs nécessaires au bon fonctionnement du processus correspondant.

Toutes ces informations sont reprises sous chaque processus dans une boîte de données. Il est possible que certaines informations viennent à manquer étant donné l'éventuelle inefficacité de ces informations dans la recherche de l'optimisation de la production.

2.4.4 Flux de l'information

Le second volet très important dans la cartographie des flux de valeur est la gestion du flux de l'information au sein de l'entreprise. Dans une organisation traditionnelle, c'est le poste de contrôle de la production qui gère la transmission des informations¹⁹. Il reçoit dans un premier temps les desiderata du consommateur. Il programme alors la production nécessaire à la réalisation des biens exigés par le client et envoie les instructions aux différents processus ainsi qu'au fournisseur de matières premières pour pouvoir organiser l'approvisionnement de la chaîne de production. Ces informations déterminent alors la cadence de production de chaque processus [RS03].

Cette manière de faire s'apparente à un système productif **statique** : peu importe les fluctuations de production d'un processus, les autres produisent selon les ordres du poste de contrôle de la production. Il n'est pas rare de voir apparaître alors une accumulation d'en-cours entre des processus. Sur la figure 2.17, à la page 28, ces flux d'informations sont matérialisés par des flèches fines [RS03].

Cette organisation est en désaccord avec les principes du *lean* et de flux tiré énoncés supra et dans lequel c'est le dernier processus de la chaîne qui détermine la cadence de production afin de produire au plus juste. La figure 2.27, à la page 37, illustre ce principe. Il est suffisant de planifier la production du dernier processus de la chaîne de manière à rencontrer les exigences du consommateur pour que la production se réalise sans gaspillage.

La fluctuation dans la production du dernier processus est de cette manière transmise au début de la chaîne et les processus amont adaptent alors leur production au rythme du dernier processus. Ce système de transmission de l'information est un système **dynamique** : il s'adapte au rythme de la production.

19. Ce poste de contrôle est illustré sur la VSM de la figure 2.17, à la page 28.

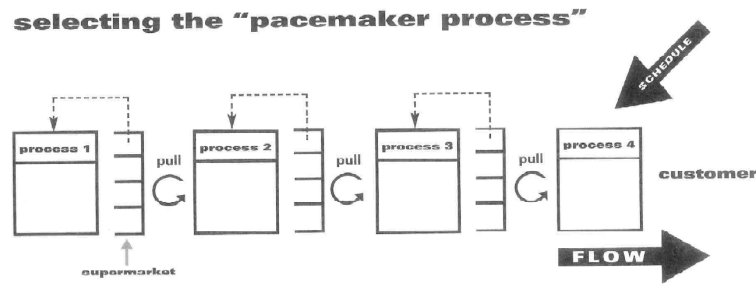


FIGURE 2.27 – Programmation du dernier processus de la chaîne [RS03]

2.4.5 Cartographie de l'état futur - Optimisation de la production

Sur base de la cartographie de flux de valeur de l'état actuel de l'entreprise, la réalisation d'une cartographie de flux de valeur de l'état futur de l'entreprise visant à optimiser la production en éliminant les sources de gaspillage doit être menée à bien. L'objectif de cette carte est de faire tendre le plus possible la chaîne de production vers un système continu [RS03].

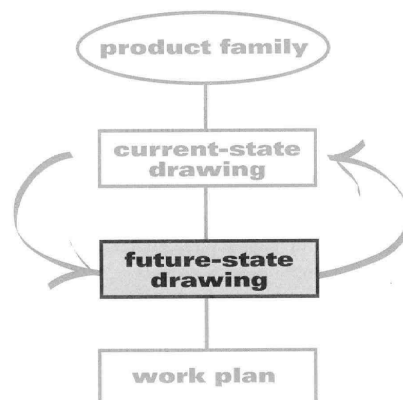


FIGURE 2.28 – État futur de la production [RS03]

Une manière simple et efficace de réaliser une cartographie future de flux de valeur est de se poser la liste de questions suivantes basées sur les fondements de la production pensée au plus juste [RS03] :

1) Quelle est le *takt time* de la production ? Comme vu précédemment, le *takt time* est le ratio entre le temps de travail disponible et la demande du consommateur. Ce temps donne ensuite le rythme auquel la chaîne de production doit produire. Répondre à

cette question requiert ensuite de comparer le *takt time* avec le temps de cycle de chaque processus afin de définir le déséquilibre existant dans le production (figure 2.29, page 38).

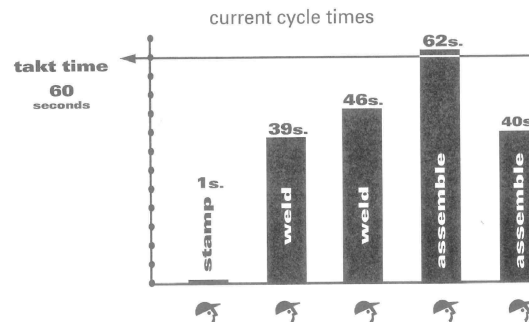


FIGURE 2.29 – Comparaison entre le temps de cycle et le takt time [RS03]

2) Au terme de la chaîne de production, quel est le type de distribution ? A la fin de la chaîne de production, il est possible que le consommateur vienne directement se servir à la fin de la dernière tâche. L'unité sortante est donc bien un produit. Cependant, pour des raisons techniques, certaines entreprises décideront de ne livrer les produits que lorsque qu'une certaine quantité de ces derniers seront réalisés. En effet, pratiquement, si des marchandises doivent être livrées hors de l'entreprise, il est ridicule de faire voyager un camion de transport pour un seul produit alors qu'il pourrait en transporter plusieurs. Également, si le consommateur décide de n'acheter des produits que par multiple de 10, il n'est pas nécessaire de livrer les produits pièce par pièce. On peut voir ces deux systèmes mis en place à la figure 2.30, à la page 38.

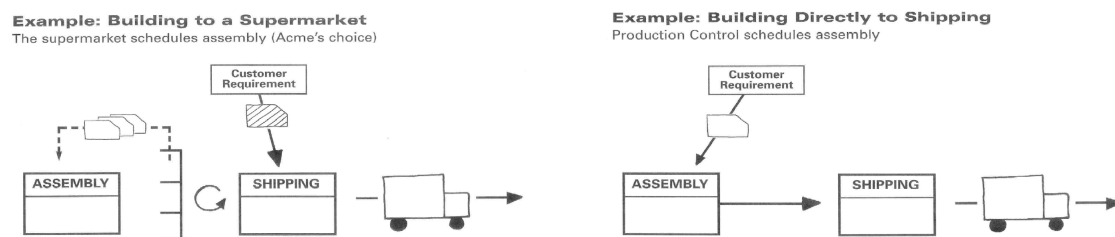


FIGURE 2.30 – Distribution au terme de la chaîne de production [RS03]

3) Où peut-on combiner des processus (figure 2.26, page 35) ? Comme on peut le voir sur la figure 2.29, à la page 38, tous les processus n'ont pas tous le même temps de cycle. Comme dit plus haut, il est alors envisageable d'associer différents processus consécutifs, tout en respectant le flux continu de travail, pour faire tendre le temps de

cycle des nouveaux processus formés vers le *takt time*. On peut voir la comparaison entre le temps de cycle et de *takt time* suite à la réorganisation de processus d'un exemple à la figure 2.31, à la page 39 [RS03].

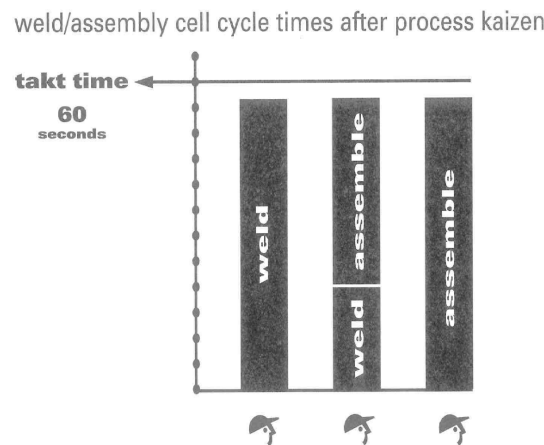


FIGURE 2.31 – Comparaison du temps de cycle et du takt time suite à l'association de processus consécutifs [RS03]

Une autre observation qu'on peut réaliser sur une telle réorganisation est que le nombre d'opérateurs est moindre qu'initialement, lorsque tous les processus étaient bien distincts (figure 2.29, page 38).

Dans son explication du *jidoka* voulant dire "*la séparation des hommes et des machines*", Ohno marque l'intérêt d'assigner plusieurs postes de commande, 2 à 4, voire plus même, à une seule personne. De manière à expliquer sa réflexion, il rappelle, à titre d'exemple, "*que, chez soi, on reste rarement à attendre devant le lave-linge que celui-ci ait fini de tourner*"[Bal04]. "*Toyota prétend libérer les opérateurs de la tyrannie de la machine pour les laisser libres de se concentrer sur des tâches qui leur permettent de mettre en valeur leur savoir-faire et leur jugement*" selon [Toy96], cité par [Bal04].

4) Où est-il nécessaire d'instaurer un système de *kanban* sur la chaîne de production ? Diversifier la production ? De manière générale, il est recommandé d'installer un système de *kanban* entre chaque processus de la ligne de production. On peut se poser la question de ce qu'il en est lorsque on demande à la production de réaliser des produits diversifiés. Certaines entreprises verront sans doute un intérêt majeur à programmer une production importante d'un certain type de produits avant de changer de type de production pour éviter les temps de réglage des machines nécessaires au changement de type de production. Ce type de production évite également la faible productivité des ouvriers due au temps d'accommodation à une tâche (cf. point 2.2.1, page 8). Cependant, cette mentalité ne rejoint pas les principes du *lean* favorisant un

flux de valeur important. En effet, le fait de produire un nombre important de produits d'une sorte avant de produire un autre type de produits ne permet pas de rencontrer les exigences des clients réclamant des produits diversifiés [RS03].

De plus, renoncer à diversifier la production régulièrement aura pour conséquence d'augmenter les stocks de produits finis ce qui est une source de gaspillage au sein de la production. Donc plus la production est variée, plus il est possible de répondre à la demande du client. De plus, cette alternance de production s'accompagne d'un *lead time* faible ainsi qu'une diminution des en-cours entre les processus.

A la figure 2.32, à la page 40, on peut voir un exemple de transition dans la production accompagné d'un système de *kanban*. Lors d'une production journalière de plusieurs centaines de pièces de 2 types différents (ici des portières de voitures gauche et droite), il est raisonnable de changer de type de production après plusieurs dizaines de pièces produites. Restons cependant vigilant au *changeover time* d'un processus afin de ne pas augmenter le *lead time* inutilement : si la production de 60 pièces prend 1 minute (1 seconde par pièce) et que le *changeover time* du processus vaut 1 heure, le ratio entre le temps de création de valeur du produit et le *lead time* du produit (équation 2.6, page 34) diminuera considérablement.

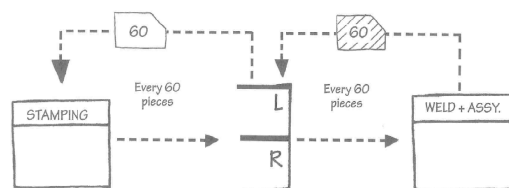


FIGURE 2.32 – Système de *kanban* implémenté sur un changement de production [RS03]

N'oublions pas qu'il est judicieux d'instaurer également un système de *kanban* au tout début de la chaîne de production, après le fournisseur de matériaux. En effet, la fourniture des matières premières peut s'apparenter également à un processus unique. Il est donc important de demander à être fourni de manière continue et de ne pas devoir stocker d'importantes quantités de matières premières. La réception par le manutentionnaire d'un *kanban* de manutention du premier processus de la ligne informe le centre de contrôle de la production qu'il est nécessaire qu'une fourniture de matériaux ait lieu.

5) Quelles sont les *pacemaker process* de la chaîne de production ? Comme expliqué via l'illustration 2.27, à la page 37, il est nécessaire de définir un ou des processus qui conditionneront la production. Si le *lean* est parfaitement mis en œuvre, programmer ce *pacemaker process* sera suffisant pour que la ligne puisse produire.

La cartographie de flux de valeur que nous pouvons obtenir suite à l'application des

améliorations énoncées supra est reprise à la figure 2.33, à la page 41. Nous pouvons y remarquer que, pour l'exemple présenté, le *lead time* descend à 5 jours alors qu'il était initialement de 24 jours environ (figure 2.17, page 28). Concernant les temps de création de valeur, ces derniers ne diffèrent pas énormément. La faible différence provient de la réorganisation des tâches présentées et de la suppression de tâches inutiles.

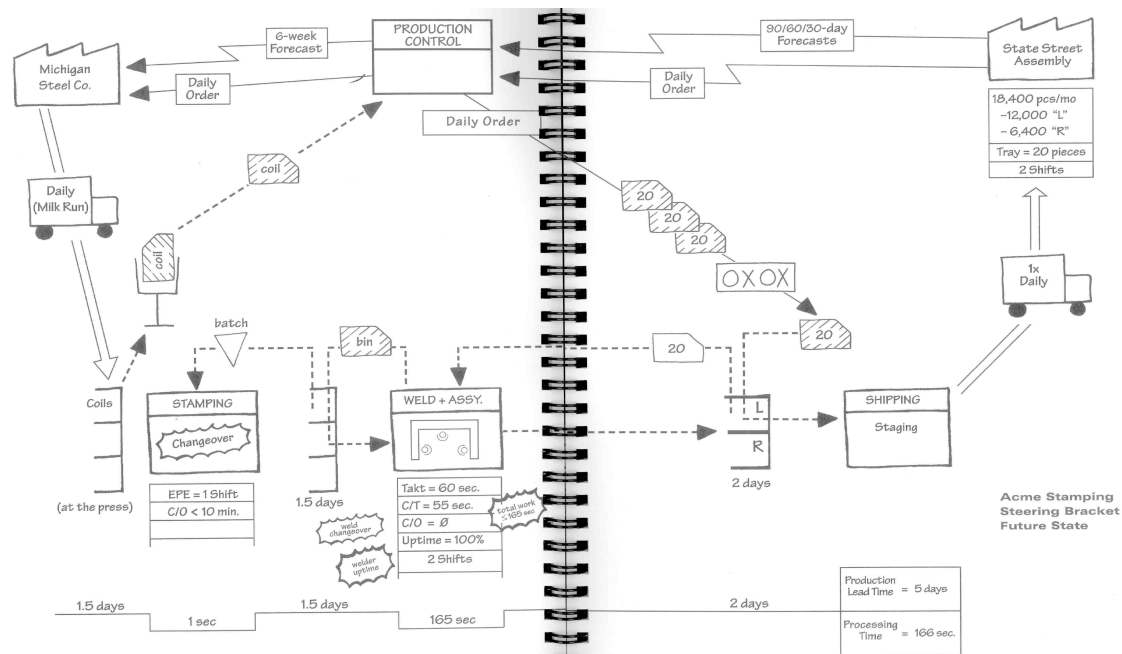
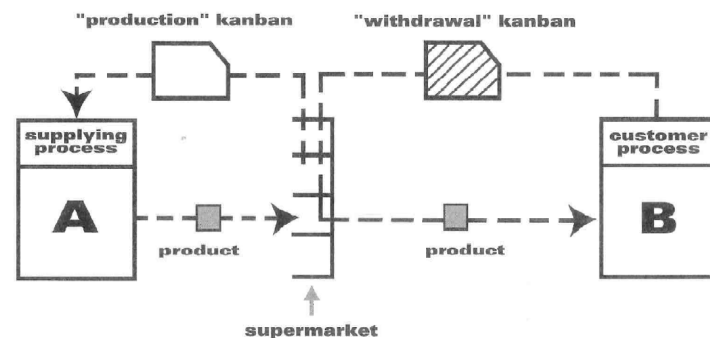


FIGURE 2.33 – Cartographie des flux de valeur de l'état futur [RS03]

2.4.6 Kanban

Un système facile à mettre en œuvre pour atteindre l'objectif de flux d'information est le système de *kanban*. Ces étiquettes sont placées entre les processus et aident à déterminer l'état de besoin du processus aval afin de limiter la production du poste amont. De manière à respecter un flux de production le plus continu possible, il est nécessaire de diminuer au maximum le nombre de *kanban* afin de limiter les en-cours de production entre chaque processus. Cependant, il est nécessaire de viser une gestion de production à moyen terme afin de subvenir à un éventuel arrêt accidentel de la chaîne de production. Le nombre de *kanban* est donc rarement égal à 1 et sera défini par la gestion de la production de l'entreprise. Le système de *kanban* est schématisé à la figure 2.34, page 42 [RS03].

Il existe deux types d'étiquettes dans le système *kanban* : les étiquettes de **transport/manutention** et les étiquettes de **production**. Dans chaque cas, l'étiquette matérialise une commande du poste B (consommateur) au poste A (fournisseur). Le système

FIGURE 2.34 – Système de *kanban* [RS03]

fonctionne comme ceci :

- Quand il en a besoin, l'opérateur du poste B, en aval, prélève un produit dans le magasin intermédiaire. Il retire le *kanban* de manutention et le dispose sur un petit tableau près de son poste de travail.
- Le manutentionnaire, responsable du flux des en-cours entre les deux postes de travail, voyant le *kanban* de manutention dans le tableau du poste B, sait qu'il y a une place de libre dans le magasin intermédiaire. Il prélève le *kanban* de manutention du tableau du poste B et substitue le *kanban* de production préalablement mis sur le produit par l'opérateur du poste A, en amont, par le *kanban* de manutention du poste B, dans le magasin.
- Le manutentionnaire vient placer le *kanban* de production dans le tableau du poste de travail A.
- L'opérateur du poste A sait à ce moment là qu'il y a une place dans le magasin intermédiaire. Il y place donc un produit avec le *kanban* de production qu'il a repris du tableau de son poste et reprend à ce moment la production.

Outre sa simplicité, le système *kanban* possède également l'avantage de réduire les lots qui transitent entre les postes de travail et d'éviter une éventuelle défectuosité répétée sur un nombre important de produits. De plus, il permet un contrôle maîtrisé du volume des stocks entre les postes étant donné que ce dernier est lié directement à la consommation aval.

Certains systèmes productifs utilisent également des *kanban* de contrôle qui valident la qualité du produit semi-finis avant que ce dernier ne soit acheminé vers le processus aval.

2.5 Flow Process Chart

Ce diagramme permet de suivre le trajet du produit au sein d'un processus et est constitué de 5 symboles de base issus du standard de symboles du *Japanese Industrial Standards JIS Z 8206*²⁰ [LDSB99]. Ces symboles, repris dans le tableau 2.2, à la page 43, représentent chacun une catégorie de tâches à savoir "Opération", "Transport", "Stockage", "Délai" et "Contrôle".

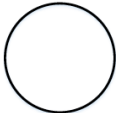

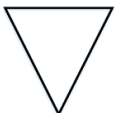

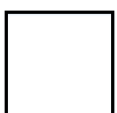
Symbole	Étape	Définition
	Opération	Le symbole représente une étape lors de laquelle le produit subit une transformation : il y a de la valeur ajoutée au produit.
	Transport	Le symbole signale que le produit est manutentionné.
	Stockage	Le symbole indique que le produit est dans un stockage.
	Délai	Le symbole indique que le produit doit attendre avant de subir l'opération suivante ou qu'il doit attendre suite à un retard dans le processus.
	Contrôle	Le symbole représente une étape lors de laquelle le produit est contrôlé, tant au niveau quantitatif que qualitatif.

TABLE 2.2 – Symboles des "Flow Process Chart" [LDSB99]

En plus de cette catégorisation, une seconde vient s'ajouter dans une analyse d'un *flow process chart*. Les tâches d'un processus sont de 3 natures : soit elles ajoutent de la valeur, soit elles n'en ajoutent pas mais sont évitables, soit elles n'en ajoutent pas et sont inévitables. Catégoriser les tâches selon ces 3 groupes peut s'avérer intéressant dans l'étude d'un système productif. Cette seconde catégorisation, basée sur un code couleur,

20. Normes industrielles japonaises.

est visible sur la figure 2.35, à la page 44 représentant un exemple de *flow process chart*.

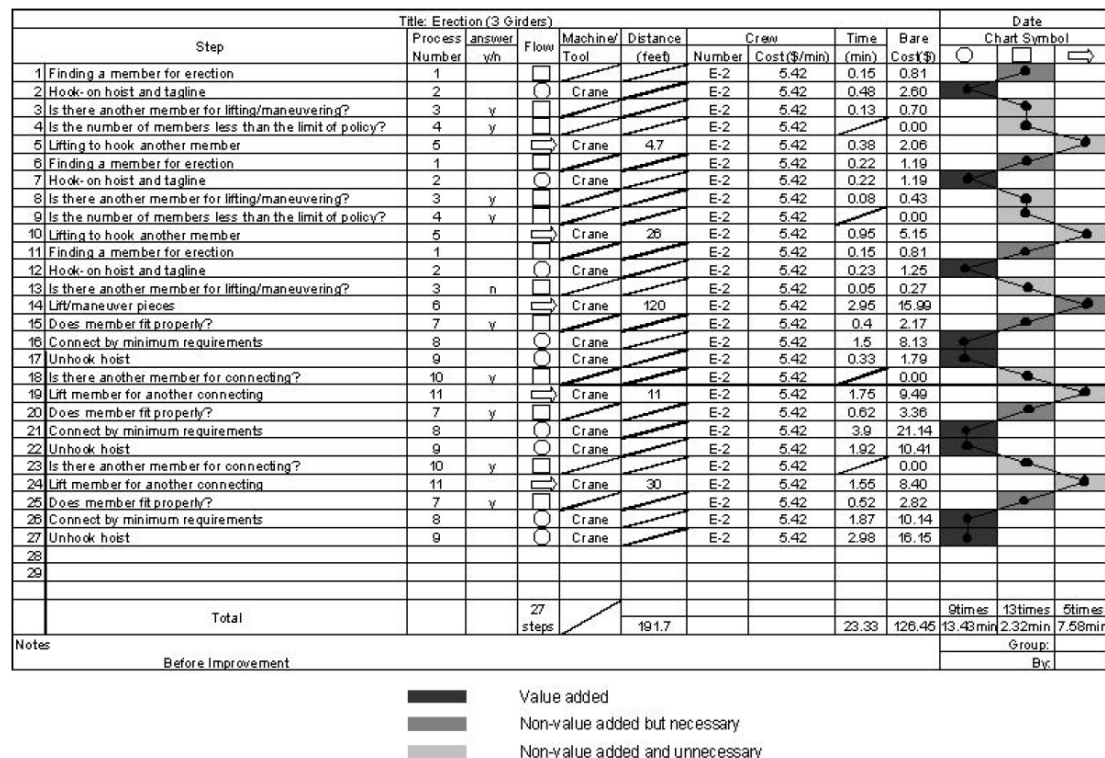


FIGURE 2.35 – Exemple de diagramme de flux dans un processus [LDSB99]

Avec cette représentation, il est aisé de repérer directement au sein du processus les tâches qui n'ajoutent pas de valeur au produit. En vue d'améliorer le système, il convient de tenter d'éradiquer les tâches de stockage et de délais. En ce qui concerne les transports, certains sont inévitables, d'autres sont évitables. Optimiser le processus revient à supprimer les transports évitables. La méthode *lean* prône une fiabilité exceptionnelle du système. Cependant, arriver à une telle perfection de fonctionnement est quasiment impossible. Des contrôles de qualité réguliers sont donc nécessaires afin d'éviter de faire transiter des produits qui ne respectent pas les critères de qualité, or ces contrôles n'ajoutent pas de valeur aux produits.

2.6 Résumé des notions théoriques utiles dans l'analyse du système CIMEDE

Les notions théoriques applicables dans le cas d'étude de ce travail sont les suivantes :

- La notion de la courbe d'apprentissage sera évoquée dans l'analyse du système

constructif CIMEDE,

- La philosophie du *lean* et le concept de flux permettront de qualifier le système productif mis en place à l'Atelier de l'Avenir,
- La méthode des *Five-Why* sera implémentée dans l'analyse des problèmes survenus lors d'une construction CIMEDE,
- L'outil phare qui sera largement utilisé dans ce travail sera la cartographie des flux de valeur, autant en atelier que sur chantier. Cependant, seulement une vision courante du système sera proposée et analysée. Les optimisations seront énoncées de manière qualitative étant donné la complexité du système global CIMEDE,
- Les représentations *flow process chart* seront également largement utilisées de manière à pouvoir cibler les sources de non création de valeur au sein du système productif.

En ce qui concerne toute la théorie propre au domaine de la construction, celle-ci n'apparaît dans ce travail que de manière indicative. En effet, il s'avère que le *lean construction* ne s'applique pas très bien au système étudié s'apparentant plutôt à une véritable chaîne de production, de part sa standardisation relative des éléments structuraux, plutôt qu'à un projet de construction traditionnel. Les outils de planification et de mesure de l'état d'avancement des chantiers, tel que le PPC, ne seront donc pas utilisés dans le cas étudié dans ce travail.

Chapitre 3

État de l'art

3.1 Value Stream Mapping et lean manufacturing

Jallas expose la réussite d'une petite équipe opérationnelle qui a appliqué la méthode de la cartographie des flux de valeur en vue d'améliorer une ligne de production automobile. Selon [Jal04], l'équipe aurait réussi à réaliser *"en 2 semaines seulement un projet d'amélioration d'une ligne de production avec un objectif de gain de 130K€ de coûts de main d'œuvre (-30%), 2 semaines d'en-cours et de trésorerie immobilisée en moins (-40%), une réduction substantielle du taux de rebut actuellement de 4% en moyenne en un gain de surfaces de 15% (sur 350m²), grâce à l'outil "Value Stream Mapping" ou, en français, "Cartographie du flux de valeur"*.

Partant d'un flux initialement poussé, de lots de produits considérables et d'importants stockages, menant, selon [Jal04], à 99,99% du temps gaspillé, l'équipe, après avoir réalisé la cartographie de flux de valeur de la ligne de production, détermina le *takt time* sur base de la consommation réelle du consommateur. Elle le compara avec le temps de cycle des processus de la ligne pour dresser une cartographie de l'état futur de la production en vue d'améliorer leur processus.

De même, selon [BB05], Balle cite un exemple de production dans lequel un industriel *"estime que la mise en place d'un système lean permet de faire des gains de productivité de main d'œuvre de 30% en deux ans, de réduire de 30 à 40% la surface utilisée en un an et de supprimer 40 à 50% de stocks en 2 ans"*.

3.2 Value Stream Mapping et lean dans le domaine de la construction

Dans la construction, la productivité se traduit par la réalisation d'un projet de qualité au prix le plus bas. Il est cependant difficile d'obtenir une méthode standard de mesure de la productivité dans le domaine de la construction à cause de la complexité des projets et de l'unicité de ces derniers ne nécessitant pas d'opérations répétitives, contrairement à l'industrialisation [FA10].

Fin du 19^{ème} siècle, Franck Gilbreth, ingénieur en management et considéré comme le père de l'ingénierie industrielle, a été le premier à observer l'activité des ouvriers sur chantier et à analyser les sources d'inefficacité de cette dernière. Il détaille dans l'un de ses ouvrages [FA10] l'activité d'un maçon sur un chantier. Ce dernier, devant se baisser pour prendre chaque brique une à une, nécessitait un certain temps et une certaine énergie. Il envisagea alors la réalisation d'un support pour que les briques soient juste à la bonne hauteur et que le maçon ne doive plus se baisser. Il a de plus assigné aux ouvriers peu qualifiés sur le chantier de réapprovisionner en briques les maçons disposant des dernières sur le mur permettant aux ouvriers plus qualifiés de s'adonner pleinement à leur tâche. Ces premières améliorations eurent comme conséquence une diminution de la quantité de déplacements sur chantier et donc une réduction de la fatigue des ouvriers et une productivité accrue. Frank Gilbreth commença à rédiger des normes de travail en y déterminant la charge de travail journalière maximum possible d'un ouvrier pour toute une multitude de tâches [FA10].

L'accroissement du développement de la construction face à celui de l'industrialisation était moindre étant donné la faible demande du client dans le domaine de la construction face à celle des biens manufacturés. La tendance concernant le concept de maître d'œuvre coordonnant la conception et la construction d'un projet et rassemblant sur une seule et même personne l'intégralité des responsabilités se modifia pour passer à une répartition des tâches et des responsabilités. La croissance de la productivité est causée par l'application de nouvelles technologies telles que de nouveaux outils et de nouveaux matériaux ainsi que par des innovations telles que la préfabrication d'éléments structuraux, la modularisation ainsi que l'automatisation et la robotique. Finalement, l'application d'outils informatiques servirent à la planification et à l'ordonnancement de projets. Malgré ces avancées, le secteur de la construction resta méfiant et contradictoire à plus d'un égard, ce qui se solda par des comportements contre-productifs et coûteux. Ces derniers portèrent principalement sur le faible pourcentage du nombre total d'heures de travail allouées à l'ajout de valeur à la construction. *"Une étude réalisée en 1990, il y a 23 ans d'ici, par le Construction Industry Institute¹, basé au Texas, et parrainée par Michael Pappas (1990), a noté que, dans l'érection de structures en acier, seulement 11,4% des heures de travail enregistrées représentait un travail ajoutant de la valeur.*

1. CII.

Dans les projets de tuyauterie industrielle, ce pourcentage tombait à l'époque à 7,5% [FA10].

D'autres études prouvèrent également que seulement 30% du temps de travail était réellement rentable pour la construction, les plus grosses sources de gaspillage étant l'acheminement et la manutention des matériaux et les déplacements sur chantier (figure 2.9, page 18). Il a été montré également que 3 à 20% des étapes d'un processus ajoutait réellement de la valeur et que le rapport du temps de création de valeur sur le *lead time* s'élevait seulement de 0,5 à 5% [FA10].

Certains industriels paraissent septiques à l'idée de l'applicabilité du *lean* au domaine de la construction : "*Parler d'innovation dans un domaine aussi conservateur que le bâtiment peut sembler surprenant*"² [Bal12]. Cependant, l'auteur de la citation annonce plus loin que son entreprise a pu déposer 2 brevets juste en appliquant le *lean* et ses outils comme la cartographie des flux de valeur sur des chantiers menant progressivement à des solutions innovantes.

Une des améliorations efficaces à apporter au domaine du bâtiment en vue d'appliquer la méthode *lean* est de revoir l'organisation de l'acheminement des matériaux sur le chantier afin d'éviter les stocks et de perdre de la place et des ressources nécessaires à la gestion de ces stocks. De plus, le stockage des matériaux sur site sont sujets à la détérioration due aux mauvaises conditions de stockage (pluie, gel, vent, etc.), au vandalisme ou encore au vol. Un autre inconvénient du stockage est le risque d'obsolescence de certains matériaux suite à un changement de solutions techniques [ARWYWL12].

Une méthode facile à appliquer lors de la planification d'un projet afin d'éviter les processus n'ajoutant pas de valeur se base sur 3 étapes consécutives. La première étape consiste à déceler l'ensemble des sources de gaspillage en identifiant les processus n'ajoutant pas de valeur sur base d'une cartographie des flux de valeur de l'état existant du système constructif. Dans un second temps, la méthode préconise une analyse de ces sources de problèmes avec méthode comme le "*5-Why*" permettant de déterminer la source primaire du problème. Troisièmement, la méthode recommande de répondre au gaspillage décelé en appliquant la méthode du "*5S*", visant à optimiser la logistique des postes de travail, le principe du JIT, visant à éviter l'accumulation d'en-cours et de stockage, le LPS afin d'optimiser le planning de construction ou encore la méthode *kanban* visant à optimiser le flux d'information sur le chantier [ARWYWL12].

Début des années 90, des conférences³ mondiales portant sur le *lean construction* apparurent et la création du *Lean Construction Institute*⁴ par Glenn Ballard et Greg Howell eu lieu aux États Unis en 1997. Ces deux entités s'attèlent depuis au développement du *lean construction*. D'autres organisations dédiées à ce nouveau mouvement

2. Jean-Baptiste Bouthillon, PDG de l'entreprise de construction Paris-Ouest Construction.

3. *International Group for Lean Construction* - IGLC

4. LCI.

furent formées au Chili, au Danemark, en Angleterre ainsi que dans de nombreux autres pays [FA10].

Lauri Koskela annonce que les problèmes du secteur de la construction sont bien connus : faible productivité, sécurité défaillante, mauvaises conditions de travail et qualité insuffisante [WTW93]. Il annonce que les pistes de progrès pour répondre à ces difficultés sont l'industrialisation, i.e., l'association de la préfabrication et de la modularisation. Par ailleurs, Koskela dénonce l'outil informatique comme étant une solution à la discontinuité dans le domaine de la construction.

Selon Koskela, l'application de la théorie *lean* dans le secteur de la construction semble limitée pour le moment pour 3 raisons particulières :

1. La concrétisation des nouveaux concepts d'organisation au sein de la construction a été réalisée pour certains projets bien spécifiques. La généralisation des concepts théoriques au domaine de la construction reste encore vague,
2. Le manque de compétitivité internationale dans le domaine de la construction ne force pas les entrepreneurs à optimiser les processus de construction,
3. Les institutions académiques ne peuvent pas encore répondre de manière fiable en termes de *lean construction*.

Il semble donc, selon Koskela, que les concepts intrinsèques au *lean* ne sont pas inapplicables au domaine de la construction et qu'il ne s'agit que d'une question de temps [WTW93].

Le plus gros problème de la construction pour le moment est que l'aspect de flux n'est pas présent, ce qui engendre de nombreuses tâches qui n'ajoutant pas de valeur. Chaque intervenant dans un projet voit encore trop son intérêt personnel sans se soucier de l'ensemble du projet. Par ailleurs, d'autres enjeux sont actuellement prioritaires dans le domaine de la construction, telle que la prévention incendie, au détriment de la planification. Les sources de gaspillages engendrées sont recensées dans le tableau de la figure 3.1, à la page 50.

Malgré la difficulté de faire changer les mentalités, certaines initiatives relatives à l'amélioration de la planification des projets de construction ont vu le jour dans quelques pays européens comme aux Pays-Bas avec l'"*Open Building System*", en France avec la "*Sequential Procedure*" ou encore en Finlande avec la "*New Construction Mode*". Ces méthodes se basent essentiellement sur la standardisation, la coordination modulaire et la préfabrication [Kos92].

Waste	Cost	Country
Quality costs (non-conformance)	12% of total project costs	USA
External quality cost (during facility use)	4% of total project costs	Sweden
Lack of constructability	6-10% of total project cost	USA
Poor materials management	10-12% of labor costs	USA
Excess consumption of materials on site	10% on average	Sweden
Working time used for non-value adding activities on site	Appr. 2/3 of total time	USA
Lack of safety	6% of total project costs	USA

FIGURE 3.1 – Sources de gaspillages dans le domaine de la construction [Kos92]

3.2.1 Chargement des processus de construction

En ce qui concerne les raisons contraignant l'application du *lean* au domaine de la construction, Ballard met en avant le fait qu'il est coutume aujourd'hui de charger un processus à 100% de sa capacité. Ceci n'est acceptable que pour une fiabilité de production exceptionnelle du processus susnommé. Or, dans la pratique courante, une telle fiabilité est extrêmement rare et une variabilité de production semble inévitable. Surtout lorsque l'on considère l'ensemble des processus d'une chaîne de production. [ASDSM99] dénoncent à ce titre les facteurs extérieurs au processus même. Ballard estime donc que le chargement d'un processus à 100% de sa capacité ne peut donc que diminuer le PPC d'un processus, toutes autres choses restant égales. Une variabilité normale et naturelle est donc à prendre en compte initialement lors de la planification d'un projet, malgré les avancées technologiques et méthodologiques. La difficulté résidant dans la détermination de cette variabilité naturelle étant donné les changements d'équipes, les variations de conditions de travail, de produits réalisés, etc. [Bal99]. Cette considération n'est que très peu effectuée actuellement, empêchant une fluidité dans l'enchaînement des processus de construction.

D'autre part, Ballard annonce également qu'il est intéressant de revoir à la baisse la quantité de ressources allouées à certains processus afin de diminuer la capacité d'un processus dans la but d'éviter que, suite à une variation de flux de travail au sein d'une chaîne de travail, une partie de la capacité du processus aval soit inutilisée.

En diminuant la capacité et la charge des processus, un meilleur flux de travail peut circuler au sein de la chaîne et, gardant bien à l'esprit que chaque processus est le consommateur du processus amont, un meilleur flux de travail ne peut qu'améliorer la productivité de chaque processus [Bal99].

3.2.2 Préfabrication et industrialisation

A l'heure actuelle, la préfabrication prend de plus en plus d'ampleur dans le monde qui nous entoure. En effet, ce système productif possède le net avantage de pouvoir maîtriser correctement les conditions de fabrication : température, humidité, ergonomie, accessibilité des outillages, mise en place des matériaux, exactitude dans la mise à forme des matériaux, etc. Conditions qu'il n'est pas possible de maîtriser sur chantier suivant la météo et le contexte géographique et topographique du terrain sur lequel le chantier est mis en place.

Cependant, la préfabrication peut nécessiter un important dispositif de manutention lorsque les éléments structuraux à transporter deviennent assez encombrants. De plus, les tolérances sur les éléments structuraux doivent être assez importantes étant donné le manque de flexibilité possible sur chantier lors de l'assemblage des différents éléments structuraux.

Certains auteurs ont utilisé la cartographie des flux de valeur dans la construction d'un pont en Suède afin de déterminer si la préfabrication de ce dernier diminue la complexité du chantier comparé à une approche constructive traditionnelle. La cartographie de flux de valeur est ici utilisée, non pas pour repérer toutes les sources de gaspillage des systèmes, mais pour se concentrer sur les processus de construction principaux afin de pouvoir comparer la complexité des deux approches constructives [LS12].

Les résultats de l'étude des deux options révèlent une nette diminution du *lead time* et de la complexité de la construction sur site suite à la mise en œuvre de la préfabrication. La planification, le contrôle et l'exécution d'un tel système s'en retrouvent simplifiés. La préfabrication reste cependant un système fragile et sensible à la variation temporelle des livraisons. Le manque de flexibilité de la préfabrication⁵ représente également un frein à une modification de conception en cours de chantier [LS12].

Les auteurs expriment le fait que l'aspect non-répétitif d'une telle construction ne semble pas justifier l'utilisation de la VSM. Dans le cas d'une standardisation du système constructif, une étude plus approfondie, sur base d'une VSM, tenant alors compte de tous les processus externes à l'exécution sur site, semble intéressante. D'autres outils tels que des outils 3D, 4D ou de *Building Information Models*⁶ semblent plus adéquats pour optimiser la conception de la préfabrication du système avant la construction proprement dite [LS12].

La VSM semble donc être plus adéquate pour analyser les systèmes constructifs industrialisés de bâtiments dont le concept est déjà connu depuis longtemps comme le montre cette étude qui date de 1977, il y a 36 ans, à propos d'un système constructif

5. Qui, par définition, ne se base pas sur un concept de standardisation, contrairement à l'industrialisation dont l'objet est l'aspect répétitif des produits

6. BIM

industrialisé au Cameroun se basant sur une structure bois comme le système CIMEDE [Tem77].

3.3 Système modulaire industrialisé et personnalisation

Certains auteurs ont tenté de montrer qu'il était possible d'atteindre un certain niveau de personnalisation de logements à partir de composants pré-assemblés et modulaires standardisés sur base de plusieurs modèles génériques de chaînes d'approvisionnement [BPD⁺03]. Les auteurs se basent sur un système préfabriqué de logement japonais pour présenter leurs résultats.

La question à se poser dans ce cas est *"où et à quel niveau dans le système de production la standardisation et le pré-assemblage doivent être intégrés pour être le plus bénéfique ?"* [BPD⁺03].

L'auteur a repris différents types d'approvisionnements allant de la configuration du logement dès la conception de ce dernier offrant une totale personnalisation mais nécessitant un temps d'attente plus important de la part du consommateur, jusqu'à la maison clé sur porte pour laquelle le consommateur n'a plus le pouvoir de personnalisation mais ne doit par contre pas attendre de délais avant de bénéficier du bien qu'il convoite (figure 3.2, page 52) [BPD⁺03].

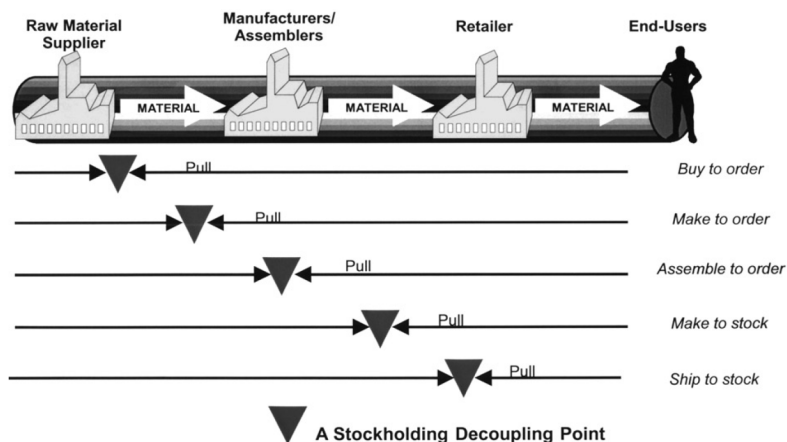


FIGURE 3.2 – Stratégies de chaînes d'approvisionnement [BPD⁺03]

Chacune de ces stratégies productives nécessitent un plan financier particulier : certains types de productions prôneront l'économie d'échelle tandis que d'autres prôneront l'économie de "gamme" dans laquelle les industriels investissent dans des machines polyvalentes.

Les conséquences en termes de coût et de délais en fonction du niveau de personnalisation sont reprises sur la figure 3.3, à la page 53. Les zones A et B représentent les régions dans lesquelles une stratégie de production ne peut pas apparaître compte tenu des contraintes de coût et de délais [BPD⁺03].

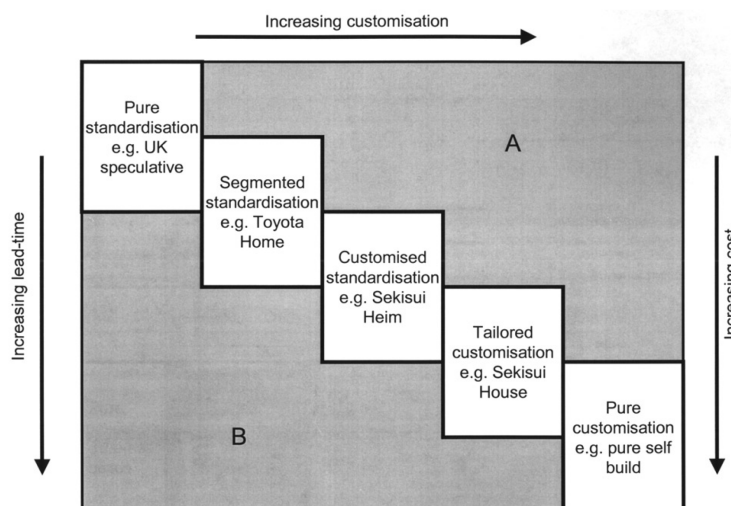


FIGURE 3.3 – Matrice d'identifications des stratégies de chaînes d'approvisionnement [BPD⁺03]

3.4 Mesure de productivité et systèmes constructifs industrialisés de bâtiments

3.4.1 Etude d'un cas concret : érections de poteaux métalliques

Certains scientifiques ont tenté de mesurer la performance de l'application des principes du *lean* au domaine de la construction via la simulation numérique de l'érection de poteaux métalliques. D'un premier abord, il semblerait que modifier intégralement les processus de construction traditionnels risque d'être excessivement cher et de prendre énormément de temps. L'expérience a d'abord eu pour objet de distinguer les 3 styles de production que l'on peut trouver dans les usines actuellement : la production à la pièce, ne détenant pas une grande productivité mais offrant une grande variété de produits, la production de masse, possédant une importante productivité mais ne proposant pas un large panel de produits et la production *lean*, s'inscrivant dans une démarche flexible et suggérant une production personnalisée au plus juste. Cette distinction est reprise dans le tableau de la figure 3.4, à la page 54.

Selon [ASDSM99], la construction appartient au premier type de production. La

Production Type	Worker's Skill	Technology
Craft	High	Simple
Mass	Unskilled/semiskilled	High-rigid
Lean	Multi-skilled	High and Flexible

FIGURE 3.4 – 3 types de production [ASDSM99]

question que se posent les auteurs est "*le domaine de la construction peut-il apprendre des développements de l'industrie de manufacture et se diriger vers une démarche lean ?*". La rigidité du domaine de la construction peut-elle être mise en défaut par l'application des principes *lean* ?

Dans un premier temps, les auteurs ont dressé une liste des paramètres influençant la gestion de la production menant à 12 scénarios possibles. Ces paramètres sont la taille des lots, la conception de la production et le degré de coordination, comme le suggère le tableau de la figure 3.5, à la page 54.

LEAN DECISIONS	DECISIONS OUTCOME
How big is the buffer size?	Big, Medium, Small
What is the process design?	Traditional, Lean
What is the degree of coordination?	Weak, Strong

FIGURE 3.5 – Paramètres conditionnant la production [ASDSM99]

3 simulations ont été ensuite implémentées sur base des ces paramètres :

- Le cas de base ("Base" sur le graphique) est l'organisation initialement étudiée,
- Le scénario 8 de l'étude ("Replication-8" sur le graphique) correspondant à une taille de lot moyenne, une stratégie de production *lean* et une coordination sévère,
- Le scénario 12 de l'étude ("Replication-12" sur le graphique) correspondant à une taille de lot faible, une stratégie de production *lean* et une coordination sévère.

Les PPC de chacun de ces scénarios, sur base d'une planification initialement élaborée par les chercheurs, sont illustrés sur la figure 3.6, à la page 55.

On voit sur le graphique que le rapport est beaucoup plus important pour une approche fonctionnant avec de petites tailles de lots que pour une approche avec un important stockage de matériaux sur le site. Ces courbes permettent de mettre en avant la continuité du travail dans le cas du scénario 12 et la discontinuité dans le cas de base et du scénario 8.

Par ailleurs, on peut voir clairement sur la courbe le phénomène d'apprentissage dont il est question au point 2.2.1, à la page 8.

Les auteurs annoncent que, suite à l'application des principes *lean* au cas étudié, une

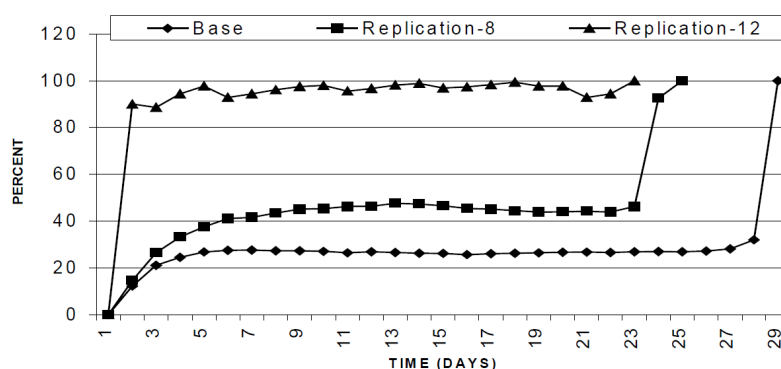


FIGURE 3.6 – PPC journaliers pour différents scénarios de production [ASDSM99]

amélioration du temps de cycle peut aller jusque 30%, la productivité peut être améliorée de 40%, le temps d'utilisation des ressources peut être amélioré de 60% par rapport au cas de base.

Par ailleurs, les résultats montrèrent que le temps de cycle total, ou *lead time*, est fortement dépendant de la taille des lots de production. Pour le cas étudié, le temps de cycle total, pour des petites tailles de lots, peut varier de 22 pour une stratégie de production *lean*, à 32 jours dans le cas d'une gestion traditionnelle. Par contre, le temps de cycle total, pour une taille de lot grande, varie quant à lui de 24 pour une approche *lean* à 28 jours pour une approche traditionnelle. Conclure que les tailles importantes de lots permettent de diminuer en moyenne les temps de cycle contrairement au taille de lots petites semble hâtif. La justification de ces résultats est nuancée. Dans un premier temps, les importantes tailles de lots provoquant d'important stockages peuvent aider la chaîne de production à faire face à la variabilité de production. D'autre part, les unités de production importantes vont à l'encontre de l'amélioration continue et la gestion des stocks de produits nécessite du temps gaspillé n'ajoutant pas de valeur au produit [ASDSM99].

La fragilité d'un système dans lequel la taille des lots diminue est également ici mise en avant. En effet, ce système est très sensible à la variation de flux dû à certains facteurs extérieurs, e.g., des retards de commandes, un accident de chantier, des matériaux non conformes aux critères de qualité, etc. et le chantier risque d'être retardé.

En conclusion, l'étude réalisée par [ASDSM99] démontre qu'une taille modérée des lots de production semble être le juste milieu entre amélioration du système et stabilité du système et qu'il est important de bien dimensionner ces tailles de lots afin de pouvoir tirer un bénéfice complet des bienfaits de la théorie *lean*.

3.4.2 Etude d'un cas concret : construction métallique

Une autre étude a tenté d'identifier et de quantifier les sources de gaspillage au sein du domaine de la construction [LDSB99]. Les auteurs ont également pris comme exemple d'étude l'érection d'une structure métallique dans laquelle les tâches à réaliser sont relativement répétitives.

Les auteurs expliquent dans un premier temps que, dans la construction traditionnelle, il n'est pas évident de mesurer les gaspillages. En effet, il n'est pas évident de distinguer les tâches ajoutant de la valeur à une construction des tâches n'ajoutant pas de valeur. Encore faut-il savoir ce que représente la valeur, celle pour laquelle le consommateur est prêt à payer [LDSB99].

La première constatation de l'étude a été que le fabricant de poutres métalliques a tendance à apporter les poutres sur le terrain par lots de pièces identiques. L'entrepreneur doit donc passer dans chaque lot de poutres et de poteaux pour regrouper les poutres métalliques nécessaires à la fabrication d'une partie du bâtiment. Cette manière de faire engendre des trajets superflus qui consomment de l'énergie mais n'apportent pas de valeur à la structure en cours de construction. Une piste d'amélioration du système est de revoir le séquençement de montage de la structure. Une autre piste serait également de grouper les poutres relatives à une partie de la structure à l'avance afin d'éviter le temps gaspillé dans les trajets du constructeur métallique sur le terrain. Ces optimisations de construction sont illustrées sur la figure 3.7, à la page 56. La configuration initiale du chantier est représentée sur la gauche tandis que les améliorations apportées au processus d'érection de la structure métalliques sont représentées sur la droite. L'explication des différentes opérations est reprise sur la figure 2.35, à la page 44 représentant le *flow process chart* de la gestion initiale du chantier [LDSB99].

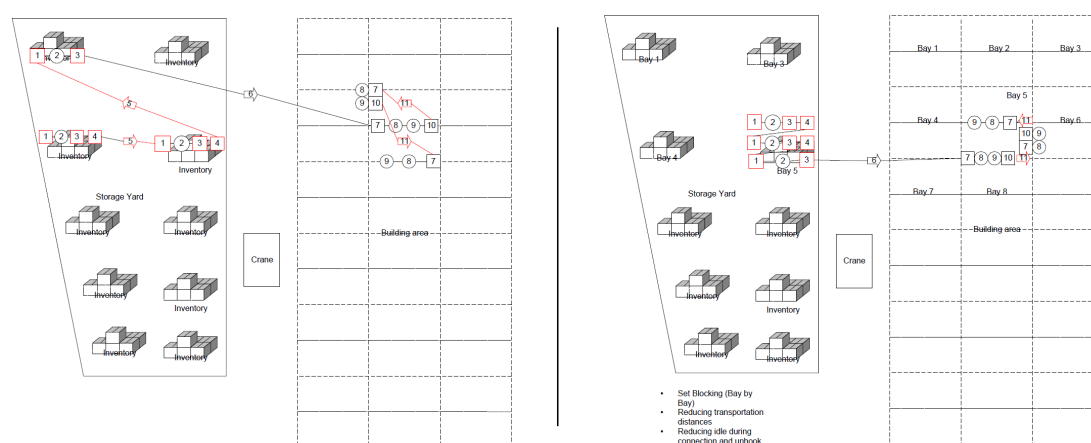


FIGURE 3.7 – Érection d'une structure métallique - Amélioration du système initial [LDSB99]

Le *flow process chart* du processus d'érection optimisé du cas étudié est repris sur la figure 3.8, à la page 57.

Title: Erection (3 Girders)										Date		
Step	Process Number	Answer y/n	Flow	Machine/ Tool	Distance (feet)	Crew Number	Cost (\$/min)	Time (min)	Bare Cost (\$)	Chart Symbol		
1 Finding a member for erection	1		□			E-2	5.42		0.00	○	□	⇒
2 Hook-on hoist and tagline	2		○	Crane		E-2	5.42	0.48	2.60	●	□	
3 Is there another member for lifting/maneuvering?	3	y	□			E-2	5.42		0.00		□	
4 Is the number of members less than the limit of policy?	4	y	□			E-2	5.42		0.00		□	
5 Finding a member for erection	1		□			E-2	5.42		0.00		□	
6 Hook-on hoist and tagline	2		○	Crane		E-2	5.42	0.22	1.19	●	□	
7 Is there another member for lifting/maneuvering?	3	y	□			E-2	5.42		0.00		□	
8 Is the number of members less than the limit of policy?	4	y	□			E-2	5.42		0.00		□	
9 Finding a member for erection	1		□			E-2	5.42		0.00		□	
10 Hook-on hoist and tagline	2		○	Crane		E-2	5.42	0.23	1.25	●	□	
11 Is there another member for lifting/maneuvering?	3	n	□			E-2	5.42		0.00		□	
12 Lift/maneuver pieces	6		⇒	Crane	120	E-2	5.42	2.95	15.99		□	
13 Does member fit properly?	7	y	□			E-2	5.42	0.4	2.17		□	
14 Connect by minimum requirements	8		○	Crane		E-2	5.42	1.5	8.13	●	□	
15 Unhook hoist	9		○	Crane		E-2	5.42	0.33	1.79	●	□	
16 Is there another member for connecting?	10	y	□			E-2	5.42		0.00		□	
17 Lift member for another connecting	11		⇒	Crane	4	E-2	5.42	0.75	4.07		□	
18 Does member fit properly?	7	y	□			E-2	5.42	0.62	3.36		□	
19 Connect by minimum requirements	8		○	Crane		E-2	5.42	1.7	9.21	●	□	
20 Unhook hoist	9		○	Crane		E-2	5.42	1.2	6.50	●	□	
21 Is there another member for connecting?	10	y	□			E-2	5.42		0.00		□	
22 Lift member for another connecting	11		⇒	Crane	4	E-2	5.42	0.7	3.79		□	
23 Does member fit properly?	7	y	□			E-2	5.42	0.52	2.82		□	
24 Connect by minimum requirements	8		○	Crane		E-2	5.42	1.87	10.14	●	□	
25 Unhook hoist	9		○	Crane		E-2	5.42	0.8	4.34	●	□	
26												
27												
28												
29												
Total			25 steps		128			14.27	77.34	9times	13times	3times
Notes										Group:		
After Improvement										By:		

FIGURE 3.8 – *Flow process chart* du système optimisé [LDSB99]

Les résultats de l'étude de l'exemple susmentionné sont repris dans le tableau de la figure 3.9, à la page 57. On peut y voir les gains en termes de temps et d'argent après l'amélioration du système constructif de base dont seul le séquençement de montage a été modifié.

Step	No. of Steps			Time (min)			Cost (\$)			Distance (feet)		
	Before	After	Effect	Before	After	Effect	Before	After	Effect	Before	After	Effect
	Improvement	Improvement		Improvement	Improvement		Improvement	Improvement		Improvement	Improvement	
Operation	9	9	0	13.43	8.33	5.1	72.79	45.15	27.64	0	0	0
Vol. Inspection	13	13	0	2.32	1.54	0.78	12.57	8.35	4.23	0	0	0
Transportation	5	3	2	7.58	4.4	3.18	41.08	23.85	17.24	191.7	128	63.7
Total	27	25	2	23.33	14.27	9.06	126.45	77.34	49.11	191.7	128	63.7

FIGURE 3.9 – Comparaison du système initial avec le système amélioré [LDSB99]

3.4.3 Etude de cas : l'état du secteur immobilier en Inde

Le secteur de la construction résidentielle de l'Inde devrait augmenter de 26% par an jusqu'en 2014 [PDFS⁺12]. Le gouvernement a pointé du doigt l'importance de l'amélioration de la productivité des systèmes constructifs et l'optimisation de l'utilisation des ressources humaines et matérielles pour répondre favorablement à cet accroissement démographique et économique considérable. Un cas d'étude a été mené sur un immeuble de taille moyenne de 17 étages et de 4600 m², à Mumbai, en Inde, construit totalement sur site, en vue d'analyser la situation actuelle de la construction dans ce pays.

Le LPS a été mis en place partiellement dans ce projet, i.e., une planification de travail et une évaluation du PPC hebdomadaire ainsi qu'une analyse des raisons de non-complétion ont été mis en œuvre dans cette analyse. A la fin du chantier, les données ont été recueillies et les participants du projet ont été interrogés à propos des pratiques de contrôle et de rétroaction lors du chantier sur la qualité et le calendrier [PDFS⁺12].

Les résultats de l'étude ont été une forte variabilité dans le PPC dans la première moitié du chantier. Le PPC a ensuite augmenté jusqu'à 80% constamment lors de la seconde moitié du chantier. Cette amélioration de productivité est due à la satisfaction du respect des engagements et à la motivation des ouvriers générée par des bilans rétroactifs positifs dans la seconde partie du chantier. Les intervenants interrogés ont mentionné les bienfaits de l'application du LPS comme étant les causes de l'augmentation de la productivité dans la seconde moitié du chantier. Les principaux freins à l'avancement du chantier ont été, selon les personnes interrogées, la météo et les retards dans les livraisons de matières premières. En aucuns cas, la planification et la gestion n'ont été mises en cause [PDFS⁺12].

3.5 Empire State Building

La construction des 102 étages et des 200,000 m² de surface au sol utilisable, par l'intermédiaire de 57,000 tonnes d'acier et de 48,000 m³ de béton, mobilisant 3,500 ouvriers, durant un an seulement, représentant un rendement de 2 étages par semaine en moyenne, selon [WF98], fait de l'*Empire State Building* le détenteur d'un record mondial en termes de rapidité de construction [SP09]. Il apparaît pourtant que ce haut rendement de construction décroisse avec le temps, selon [Par09] cité par [SP09]. Cette diminution de productivité à travers le temps semble anormale étant donné les améliorations qu'a connu le secteur de la construction ces dernières décennies en termes de matériaux, de méthodes et de moyens de communication. L'auteur explique cette diminution de productivité par la croissance de la complexité des bâtiments contemporains [SP09].

En vue de pouvoir étudier le système de gestion de la construction de l'*Empire State Building*, les auteurs ont dans un premier temps reconstitué le calendrier du projet. Le

flux de travail régissant la construction a directement été mis en avant. La construction du gratte-ciel s'est basée sur 4 processus en série, chacun regroupant une série de tâches et mené par une opération rythmant la construction, appelée *pacemaker*. L'idée a été de regrouper ces tâches de manière à ce que chaque processus ait un temps de cycle calqué sur le *takt time*, imposé par le maître d'ouvrage, rendant la production de la construction la plus juste possible et optimisant ainsi la productivité des équipes. Les tâches les plus vulnérables au système productif, correspondant à chaque *pacemaker*, ont chacune été précédées d'un *Time buffer* représentant un tampon permettant d'absorber la variabilité de la tâche précédente et d'ainsi stabiliser ces tâches les plus vulnérables. La première tâche du système, correspondant à un *pacemaker*, n'est cependant pas vulnérable car il s'agit de l'érection des poteaux métalliques qui ne requiert pas la finition d'une tâche précédente pour avancer, si ce n'est l'érection des poteaux métalliques de l'étage inférieur. La taille des équipes et la décomposition des espaces de travail a été étudiée de manière à rendre possible ce flux de travail [SP09].

L'avancement de la construction, illustrée sur la figure 3.10, à la page 59, montre bien la continuité des opérations de construction de l'*Empire State Building*, les étages étant représentés sur l'axe des ordonnées et le temps sur l'axe des abscisses, chaque couleur représentant une tâche précise. Le flux de travail engendré par la méthode de gestion mise en place lors de la construction du gratte-ciel ressort clairement de cette représentation.

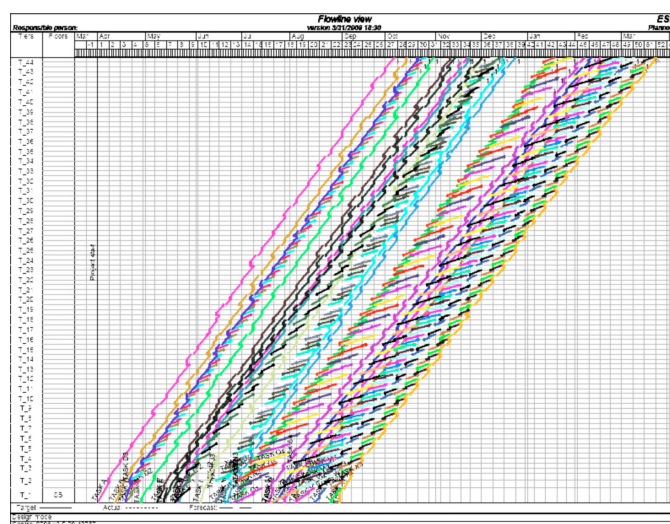


FIGURE 3.10 – Avancement de la construction de l'*Empire State Building* [SP09]

Quoi que la construction de l'*Empire State Building* s'apparente plus à un système de *Mass construction*, de par l'importance des lots de matériaux et des stocks engendrés, de l'uniformité des matériaux mis en place et des espaces construits, les principaux concepts, associés au *lean construction*, encore inconnus à l'époque, tels que la conception standardisée des éléments constitutifs et des procédures de construction, une planification basée sur un *takt time*, l'utilisation de tampons pour protéger les tâches sensibles à la varia-

bilité, un flux tiré de matériaux et un approvisionnement fonctionnant en *just in time*, une décomposition des espaces de travail en unités de production et une diminution des trajets des ouvriers grâce à un système d'apport des matériaux appropriés mis en œuvre lors de la construction de l'*Empire State Building* ont été implémentés sur le chantier de l'*Empire State Building* [SP09].

3.6 Intégration d'outils de communication tel que le BIM en construction

Certains auteurs se sont posé la question de l'application d'un système BIM en parallèle avec un système de mesure de productivité en vue d'accroître la productivité dans le domaine de la construction. Pour ce faire, une étude récente a été menée sur un projet de recherche utilisant un nouveau système constructif développé par des partenaires industriels [TSL⁺13].

L'étude s'est déroulée en 4 phases. Dans un premier temps, une évaluation de l'état actuel de l'entreprise a été menée afin de comprendre principalement la structure organisationnelle du système et de déceler les sources de gaspillage qui en découlent. Dans un second temps, une définition des objectifs souhaités par les acteurs du projet a été rédigée. Par après, des groupes de discussion ont été mis sur pied afin de pouvoir classifier les différentes exigences des acteurs du projet. Enfin, une détermination des moyens à mettre en œuvre afin de répondre à ces attentes le plus fidèlement possible a été réalisée.

Mis à part les sources de gaspillage conventionnelles telles que la littérature le mentionne, les résultats de l'étude ont montré que le plus gros problème du système mis en place par l'entreprise est le manque de communication et de coordination générant un rapport de $(VC/T)/(L/T)$ de 42% seulement. Ce résultat médiocre montre la nécessité d'intervenir sur la gestion du projet en vue d'améliorer la construction.

L'application de l'outil de communication BIM n'a cependant pas connu un franc succès étant donné la résistance des professionnels et des gestionnaires à l'adoption de nouvelles technologies au Québec. En effet, ces personnes préfèrent travailler de manière traditionnelle sans trop se préoccuper d'une gestion fiable du projet en amont. Une autre raison de ce manque d'intérêt pour le BIM et les nouvelles technologies de communication est le faible investissement de la région dans des projets multi-résidentiels générant des espaces répétitifs et permettant un flux de travail à la chaîne optimisé.

La recherche concernant l'application d'outils de communication technologiques dans les projets de construction suit cependant son cours [TSL⁺13].

Une autre recherche récente a tenté de montrer les bienfaits de l'application simultanée du BIM et du *lean* dans des projets de construction, notamment dans le cas de

projets de construction modulaire industrialisée [MAM12]. Pour ce faire, un logiciel informatique, intégré à l'ébauche de la production du système de construction modulaire industrialisé de bâtiments, a été utilisé de manière à générer la programmation de la production des éléments structuraux. Une simulation a ensuite été développée pour générer les résultats de la VSM produite sur base des principes du *lean*.

Les dessins finalement effectués par l'outil BIM ont prouvé l'efficacité du modèle proposé tant au niveau de la réduction des déchets, qu'au niveau des temps de production et de l'utilisation des ressources [MAM12].

3.7 Mauvaise compréhension des concepts lean

Il est curieux de se rendre compte que bon nombre d'entreprises qui se sont adonnées aux principes *lean* n'ont pas obtenu les résultats escomptés [Bal04]. Ballé annonce que la communauté scientifique est consciente du problème et dénonce "*une mauvaise compréhension des pratiques par les entreprises qui tentent de s'approprier le système de production Toyota*" [Bal04], notamment en ce qui concerne l'application du système *kanban* sans se soucier du lissage de production en diversifiant celle-ci. Les résultats de l'application du juste à temps restent, dans certaines entreprises, encore insatisfaisants. Ballé remarque donc bien l'intérêt de ne pas se contenter de mettre en place la méthode *lean*, mais de bien comprendre ces dernières également. Il rappelle l'importance d'impliquer l'ensemble de l'entreprise dans cette nouvelle philosophie et d'éviter qu'il y ait différentes convictions au sein de l'entreprise.

Lauri Koskela approuve les dires de Ballé, mais dans une moindre mesure cependant, suite à étude sur l'application du *lean* ces dix dernières années en Finlande [KK12b].

Ballé annonce que les résultats convainquants obtenus par certaines entreprises suite à l'application des méthodes *lean* sont dues à "*l'implication des opérateurs dans le changement*" [Bal04]. Ballé rappelle que, selon Toyota, les "*standards de travail*" [Bal04], s'inscrivant dans le processus de l'amélioration continue, doivent être définis essentiellement par les personnes les plus proches du terrain.

Chapitre 4

CIMEDE

4.1 Système constructif

CIMEDE est un acronyme de Construction Industrialisée de Maisons Évolutives, Durables et Économiques. Ce système constructif a été mis au point par l'ULg et a été concrétisé par l'Atelier de l'Avenir, succursale des Ateliers du Monceau, basée à Grâce-Hollogne, qui est une Entreprise de Travail Adapté¹ compétente dans la menuiserie industrielle, la fabrication et la réparation de palettes.

La préfabrication dans le bâtiment devenant de plus en plus importante, l'idée de réaliser un système constructif modulaire qui sera capable de répondre aux exigences du client dans le temps germa. Le but est alors de réaliser une structure ayant les portées les plus grandes possibles afin de pouvoir agencer les espaces simplement avec des éléments non structuraux mais préfabriqués également. L'idée est que le client puisse moduler lui-même son bâtiment sans l'intervention onéreuse et massive de corps de métier spécialisés.

Le matériau de base de CIMEDE est le bois. Des bois KVH², sont utilisés pour les montants et les lisses des murs ainsi que pour le chainage et les pièces d'abouts de planchers. Des bois lamellés-collés³ sont utilisés pour les solives des planchers.

Comme l'illustre la figure 4.1, à la page 63, le système constructif est assez simple. Des murs de 3 m de haut et de longueurs variables se superposent et des cornières fixées aux montants de ces derniers soutiennent des éléments de planchers de longueurs variables et de 1,2 m de large. Les planchers sont ensuite fixés aux cornières de manière à assurer le contreventement horizontal de la structure.

1. ETA - entreprise engageant majoritairement un personnel ouvrier sourd ou mal entendant.

2. Bois résineux bouveté afin de pouvoir obtenir à peu près toutes les dimensions possibles.

3. BLC.

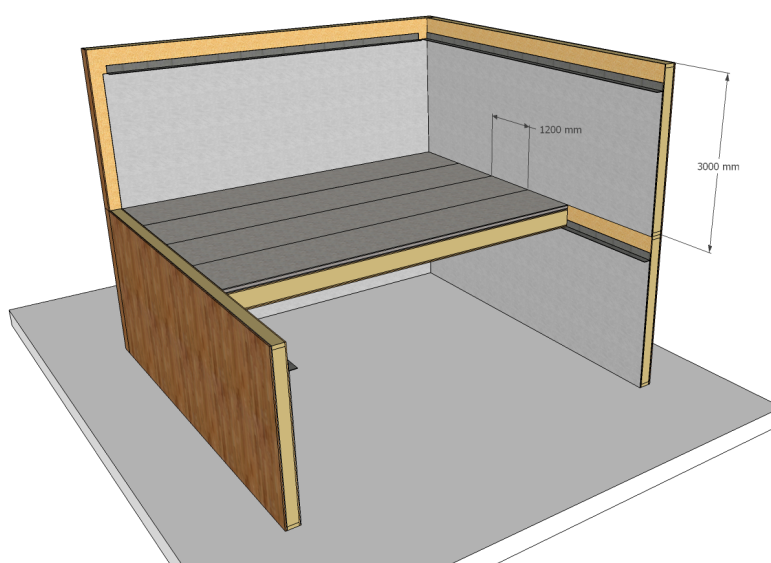


FIGURE 4.1 – Système constructif CIMEDE

Une vue en élévation de la structure est représentée sur la figure 4.2, à la page 63.

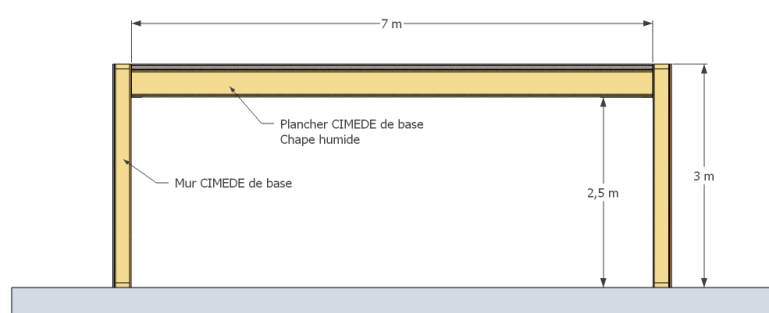


FIGURE 4.2 – Structure du système CIMEDE

4.2 Composition des éléments CIMEDE

Les compositions des éléments structuraux CIMEDE furent l'objet de longues années d'études, tant au niveau énergétique qu'économique. Une première version de la composition des murs a alors vu le jour. Ces compositions présentaient des performances techniques relativement élevées vis-à-vis d'une construction traditionnelle. Une composition de base, moins performante, mais moins onéreuse que la version initiale, a alors été mise au point. L'augmentation des performances reste possible via l'ajout d'options au modèle de base.

4.2.1 Composition des murs

Les murs sont des éléments composés d'une ossature en bois KVH comprenant une lisse inférieure, une lisse supérieure et de montants équidistants de 400 mm, d'une laine minérale, d'un pare-pluie, d'un panneau OSB assurant le contreventement de la structure et de deux panneaux de fibroplâtre VIDIWALL assurant l'isolation acoustique et la résistance au feu du bâtiment.

Une vue en élévation d'un mur type est représentée sur la figure 4.3, à la page 64.

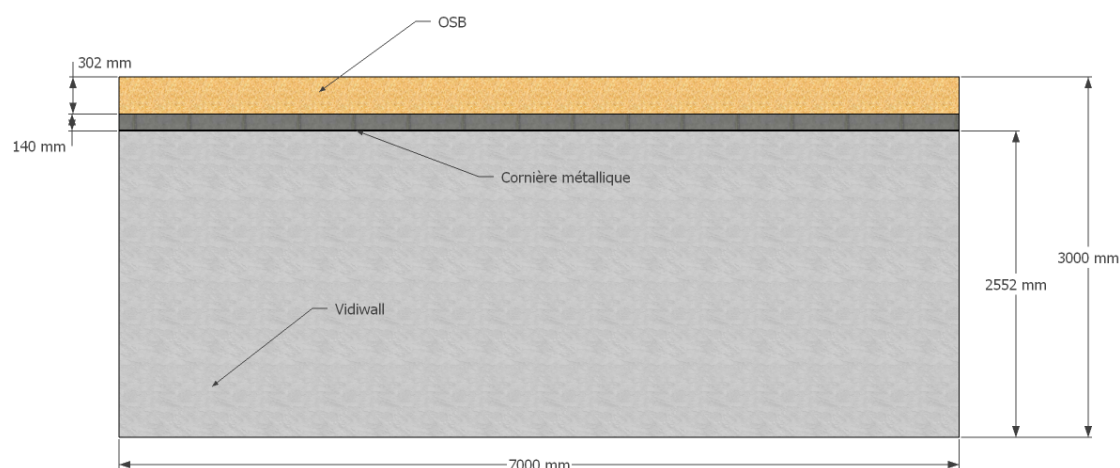


FIGURE 4.3 – Vue en élévation d'un mur CIMEDE

Les murs sont des éléments de 3 m de haut et d'une longueur variable égale à un facteur de 10 cm. La longueur maximale est de 12 m. La composition interne de base des murs extérieurs CIMEDE est reprise dans le tableau 4.1, à la page 64.

Couche [ext - int]	Composition	Epaisseur [mm]	Entreprise en charge
1	Pare-pluie (STEICO UNIVERSAL)	22	AA, en atelier
2	Plaque de fibroplâtre VIDIWALL	12,5	AA, en atelier
3	Structure (montants et lisses en bois (ép. 63mm)) Isolant entre montant (laine minérale KNAUF NATUROLL)	192	AA, en atelier
4	Panneau OSB	18	AA, en atelier
5	Plaque de fibroplâtre VIDIWALL	12,5	AA, en atelier
Épaisseur totale		257	/

TABLE 4.1 – Composition de base des murs CIMEDE

Une vue éclatée de la composition interne d'un mur extérieur est illustrée sur la figure 4.4, à la page 65.

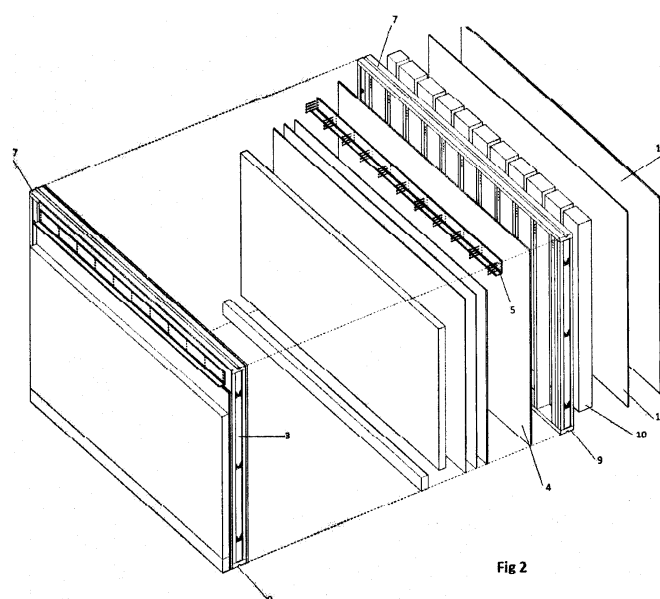


FIGURE 4.4 – Composition des murs CIMEDE [dl13]

Les options pour les murs sont les suivantes :

- Il est envisageable de rajouter deux plaques de fibroplâtre VIDIWALL (épaisseur supplémentaire de 25 mm) du côté intérieur de la maison afin d'accroître l'isolation acoustique ainsi que la résistance au feu du bâtiment,
- Il est également envisageable d'appliquer sur ces plaques de fibroplâtre deux couches de fibre de bois (STEICO THERM de 60 et de 40 mm d'épaisseur pour une épaisseur totale de 100 mm) afin d'augmenter l'isolation thermique du bâtiment en vue d'un comportement passif de ce dernier.

L'ajout de ces options élève l'épaisseur totale du mur à 382 mm.

Des coupes de la partie supérieure des murs CIMEDE permettant la comparaison entre les différentes versions de murs sont représentées aux figures 4.5 et 4.6, à la page 66.

Lorsque deux habitations sont mitoyennes, le mur séparant les deux bâtiments est constitué de deux murs CIMEDE mis côte à côte. Ces murs, appelés murs mitoyens, sont légèrement différents des murs extérieurs étant donné les différences de performances exigées par ces derniers. La composition des murs mitoyens est reprise dans le tableau 4.2, à la page 66.

La cornière métallique soutenant les planchers⁴ complète la composition du mur.

4. n°5 sur la figure 4.4, à la page 65

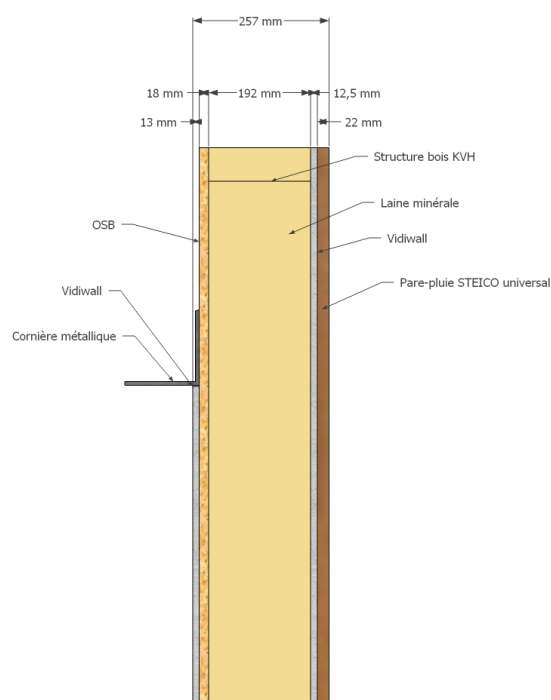


FIGURE 4.5 – Coupe dans un mur extérieur de base CIMEDE

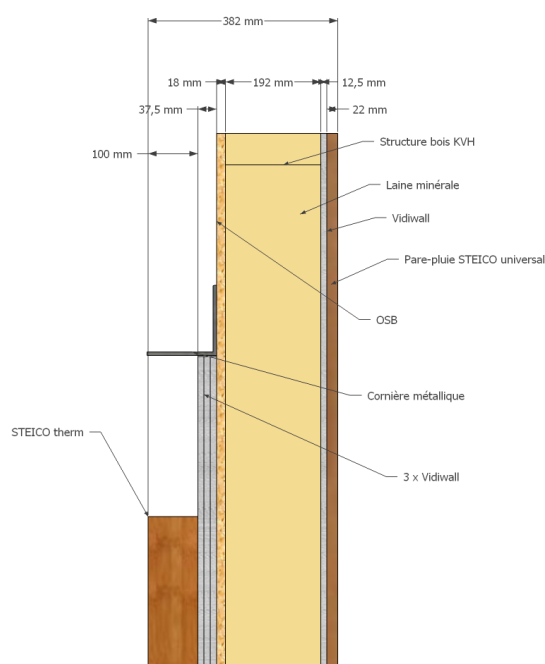


FIGURE 4.6 – Coupe dans un mur extérieur CIMEDE avec toutes les options

Couche [ext - int]	Composition	Epaisseur [mm]	Entreprise en charge
1	Panneau OSB	18	AA, en atelier
2	Structure (montants et lisses en bois (ép. 63mm)) Isolant entre montant (laine minérale KNAUF NATUROLL)	139	AA, en atelier
3	Panneau OSB	18	AA, en atelier
4	Plaque de fibroplâtre VIDIWALL	12,5	AA, en atelier
Épaisseur totale		187,5	/

TABLE 4.2 – Composition des murs mitoyens CIMEDE

Cette cornière métallique est fixée à l'aide d'une série de 4 tire-fonds M8 L130 dans chaque montant de KVH de l'ossature du mur.

Des inserts métalliques fixés dans la lisse supérieure du mur dans lesquels viennent se visser des élingues en acier permettent la manutention des murs (figure 4.7, page 67).

Le bardage extérieur n'est pas assuré par l'Atelier de l'Avenir et il est placé in situ. Par ailleurs, les châssis de fenêtre sont mis en place dans les murs en atelier (ou sur chantier si cela semble nécessaire).

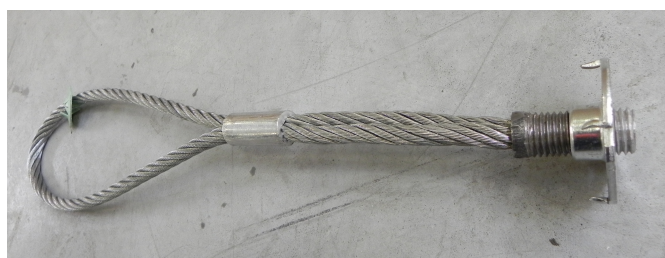


FIGURE 4.7 – Insert et élingue de manutention des murs CIMEDE

Étanchéité

En ce qui concerne l'étanchéité à l'air, une membrane est disposée sur tout le pourtour du mur du côté intérieur de manière à éviter un flux d'air dans les interstices aux jonctions des murs, sauf pour les murs du RDC pour lesquels cette membrane est une membrane étanche à l'eau. En ce qui concerne l'étanchéité à l'eau, une membrane est disposée chaque fois en pied de mur du côté extérieur. La disposition de ces membranes sur l'élément structurel est visible sur la figure 4.8, à la page 67.

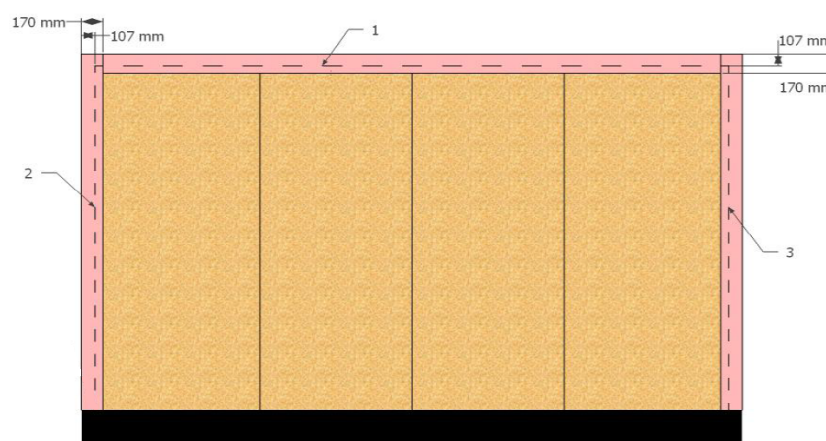


FIGURE 4.8 – Membrane pour l'étanchéité à l'eau et à l'air

Assemblage

L'assemblage entre les murs se réalise simplement par emboîtement mécanique via des connecteurs rapides de type KNAPP WALCO V. La partie mâle est fixée sur un mur tandis que la partie femelle est fixée sur un autre mur. Ces attaches rapides ne nécessitent pas d'intervention particulière sur chantier étant donné qu'elles sont fixées en atelier. Le simple poids propre des éléments permet l'emboîtement des attaches. Ces dernières sont illustrées sur les figures 4.9 et 4.10, à la page 68.



FIGURE 4.9 – Partie femelle KNAPP



FIGURE 4.10 – Partie mâle KNAPP

En ce qui concerne l'assemblage entre les murs superposés, des vis de 380 mm sont vissées de biais tous les 120 cm environ. Les murs du RDC sont quant à eux fixés à la dalle de sol à l'aide de cornières métalliques également entre-distances de 120 cm environ.

4.2.2 Composition des planchers

Les planchers CIMEDE sont également composés d'une ossature en bois mais en bois lamellés-collés étant donné le manque de rectitude des bois KVH pour de telles dimensions face aux exigences du système. L'ossature est remplie d'une laine minérale assurant l'isolation thermique et de sable assurant l'isolation acoustique. Des panneaux d'OSB permettent d'emballer le tout et d'assurer la rigidité de l'ossature. Des barres d'acier sont également dissimulées dans la structure pour permettre la manutention de l'élément de plancher. La composition de la structure est illustrée sur la figure 4.11, à la page 68.

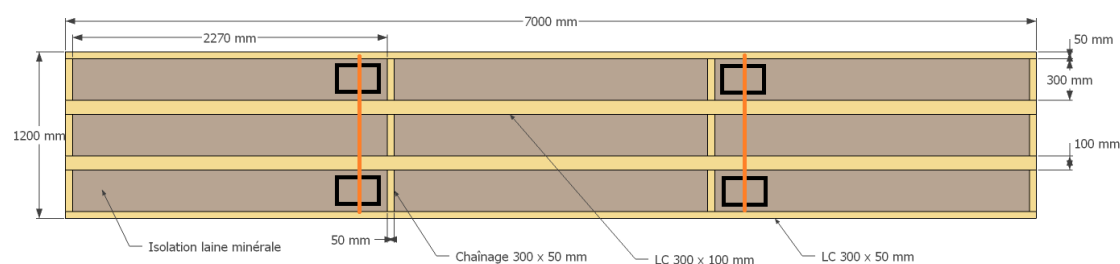


FIGURE 4.11 – Vue en plan et composition interne d'un plancher CIMEDE

La composition des planchers CIMEDE de base est reprise dans le tableau 4.3, à la page 69.

Couche [sup - inf]	Composition	Epaisseur [mm]	Entreprise en charge
1	Finition de sol	15	Sous-traitance
2	Chape humide	53	Sous-traitance
3	Résilient STEICO	20	AA, sur chantier
4	Panneau OSB	18	AA, en atelier
5	Structure bois LC (ép. 50 et 100 mm)	300	AA, en atelier
	Isolant entre bois	220	
	Panneau multiplex entre bois	3,6	
	Mélange sable-copeaux de bois entre bois	30	
5	Panneau OSB	18	AA, en atelier
6	Panneau OSB	18	AA, en atelier
<i>Épaisseur en atelier</i>		<i>354</i>	/
<i>Épaisseur sur chantier</i>		<i>88</i>	/
<i>Épaisseur totale</i>		<i>442</i>	/

TABLE 4.3 – Composition des planchers CIMEDE - Chape humide

La production en atelier ne s’occupe donc que des couches allant de l’OSB supérieur jusqu’au deux panneaux d’OSB. Le revêtement de sol se réalise in situ.

La composition de ce plancher de base est illustrée sur la figure 4.12, à la page 69.

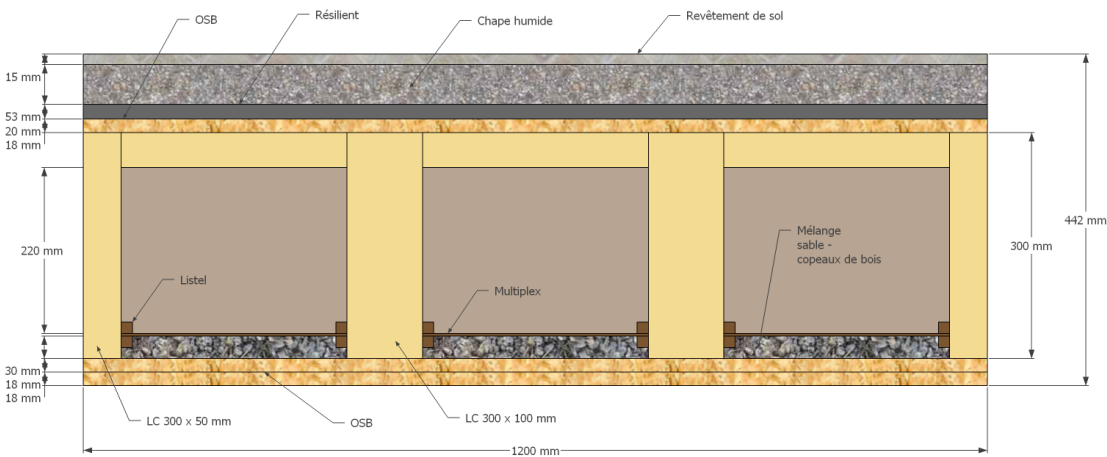


FIGURE 4.12 – Coupe dans un plancher de base CIMEDE avec chape humide

La composition initiale des planchers, telle qu’elle a été conçue lors de la phase d’étude du système constructif, est illustrée sur la figure 4.13, à la page 70. On peut voir, via cette coupe, que le système de manutention, initialement assuré pas des inserts et des

élingues métalliques, a déjà évolué puisqu'il est actuellement assuré par des barres en acier dont l'emplacement dans l'élément est visible en orange sur la figure 4.11, à la page 68. Les rectangles noirs de cette vue en plan représentent des trappes d'accès aux barres d'acier nécessaires à la manutention du plancher.

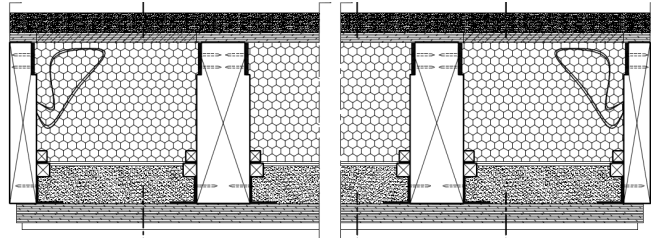


FIGURE 4.13 – Composition des planchers CIMEDE [Cat12b]

Les planchers sont également sujets à une série d'options. Les voici :

- Une plaque de plâtre de finition d'un épaisseur de 12,5 mm est envisageable sur la face inférieure du plancher,
- Une couche de sable plus importante pouvant aller jusqu'à 70 mm est envisageable afin d'améliorer l'isolation acoustique des planchers. Cet accroissement de quantité de sable augmentant le poids propre du plancher et inévitablement la flèche prise par ce dernier lors de l'exécution, un renforcement métallique est alors requis pour une portée dépassant 6,5 m⁵,
- Un revêtement sur chape sèche est envisageable pour les planchers. La configuration de cette option est reprise dans le tableau 4.4, à la page 71.

Une coupe représentant cette composition est reprise sur la figure 4.14, à la page 71, représentant la configuration de plancher "full" option. Cette illustration met en évidence également les renforts métalliques des planchers consistant en des cornières en partie inférieure et des plats métalliques en partie supérieure.

5. Le critère de flèche pris en considération pour les planchers CIMEDE correspond au critère 10 de la norme belge [03-02] dont l'exigence de la performance pour laquelle la déformation est limitée, est la résistance des revêtements de sol de grandes dimensions ou fixés rigidement. Ce critère limite la flèche prise par le plancher à $L/500$. La raison de l'application de ce critère contraignant est de deux natures. Dans un premier temps, le choix du type de revêtement du plancher est laissé libre au client, la structure doit alors pouvoir accueillir n'importe quel revêtement de sol. Deuxièmement, les cloisons n'étant pas structurelles, ce critère de flèche permet d'avoir les cloisons les plus grandes possible et de diminuer l'espace entre le sommet de ces dernières et la face inférieure du plancher. Cependant, si un revêtement de sol moins contraignant pour un projet est déterminé à l'avance et si le bâtiment en question n'est pas composé de cloisons CIMEDE mais de cloisons traditionnelles, alors le critère 11 de la norme belge [03-02] limitant la flèche à $L/350$ est pris en considération. Dans un tel cas, un renfort métallique ne sera pas requis malgré l'importance de la portée et de l'utilisation de 70 mm de sable dans les planchers.

Couche [sup - inf]	Composition	Epaisseur [mm]	Entreprise en charge
1	Finition de sol	15	Sous-traitance
2	Chape sèche KNAUF BRIO	23	Sous-traitance
3	Résilient	20	AA, sur chantier
4	Panneau de fibroplâtre VIDIWALL	15	AA, en atelier
5	Panneau de fibroplâtre VIDIWALL	15	AA, en atelier
6	Panneau OSB	18	AA, en atelier
7	Structure bois LC (ép. 50 et 100 mm)	300	AA, en atelier
	Isolant entre bois	220	
	(laine minérale KNAUF NATUROLL)		
	Panneau multiplex entre bois	3,6	
	Mélange sable-copeaux de bois entre bois	30	
8	Panneau OSB	18	AA, en atelier
9	Panneau OSB	18	AA, en atelier
<i>Épaisseur en atelier</i>		384	/
<i>Épaisseur sur chantier</i>		58	/
<i>Épaisseur totale</i>		442	/

TABLE 4.4 – Composition des planchers CIMEDE - Chape sèche

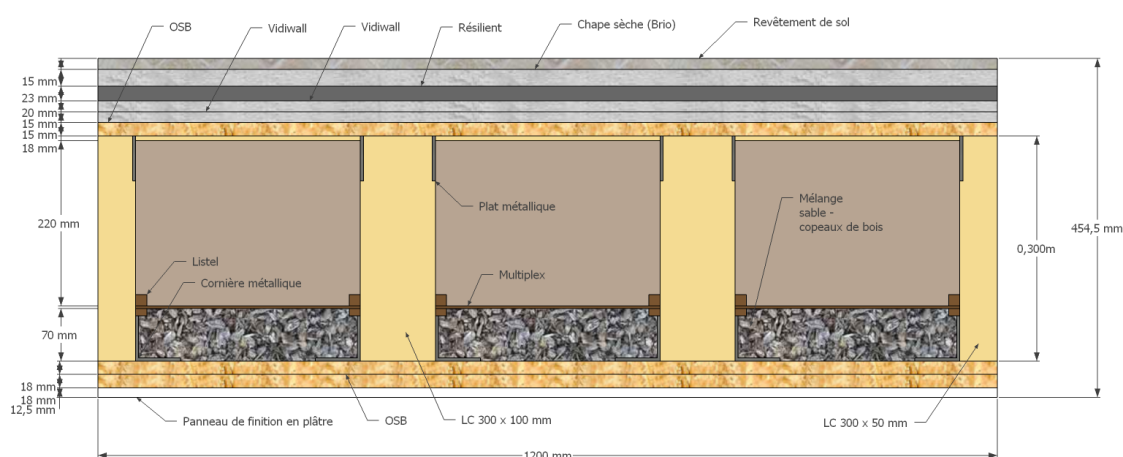


FIGURE 4.14 – Coupe dans un plancher CIMEDE avec toutes les options et une chape sèche

Étanchéité

L'étanchéité à l'air des planchers et les éléments de toiture est assurée, au niveau de la jonction avec le mur, par un compribande disposé sur la cornière métallique soutenant les planchers. L'écrasement de ce compribande sous le poids propre du plancher assure l'étanchéité à l'air. Entre les planchers, l'étanchéité est assurée par le revêtement de sol.

En toiture, l'étanchéité à l'eau et à l'air est assurée entre les éléments par le revêtement de toiture.

Assemblage

Les planchers et les éléments de toiture sont assemblés entre eux et avec les cornières qui les soutiennent. Le premier assemblage vise à solidariser tous les éléments de manière à obtenir un comportement mécanique global du plancher. Cet assemblage se réalise par les trappes d'accès (figure 4.11, page 68) via des tire-fonds de 160 mm de long et de 12 mm de diamètre à raison de 3 par trappe, ce qui représente une liaison de 12 tire-fonds entre chaque plancher, visés de biais dans les gîtes d'extrémités des planchers. Le second assemblage vise à assurer le contreventement horizontal de la structure. Il est constitué de 8 vis (4 de chaque côté) de 50 mm de long et de 4 mm de diamètre.

4.2.3 Composition des cloisons

Les cloisons sont le troisième type d'élément CIMEDE. Celles-ci sont des éléments de 2500 mm de haut et de 600 mm de large de manière à être facilement manutentionnables. Ces cloisons sont composées d'un ossature en bois, d'un isolant thermique à base de laine minérale et de plaque de fibroplâtre VIDIWALL. Une vue explosée d'une cloison est illustrée sur la figure 4.15, à la page 73.

La composition interne des cloisons est reprise dans le tableau 4.5, à la page 72.

Couche [sup - inf]	Composition	Epaisseur [mm]	Entreprise en charge
1	Plaque de fibroplâtre VIDIWALL	12,5	AdM, en atelier
2	Strucure bois	54	AdM, en Atelier
	Isolant (laine minérale)	29	
3	Plaque de fibroplâtre VIDIWALL	12,5	AdM, en atelier
<i>Épaisseur totale</i>		<i>54</i>	<i>/</i>

TABLE 4.5 – Composition des cloisons CIMEDE

L'épaisseur totale des cloisons est de 54 mm, les plaques de fibroplâtre étant en réalité dans l'épaisseur de la structure comme l'illustre la figure 4.16, à la page 73.

Deux plaques de finition en MDF prépeints⁶ sont fixées sur chantier de chaque côté de la cloison via un système d'accroche constitué de lattes en MDF biseautées (d'une épaisseur de 8 mm chacune). L'épaisseur totale de la cloison s'élève donc à 100 mm. Une vue éclatée de la pose de la finition des cloisons est illustrée sur la figure 4.17, à la

6. Épaisseur de 15 mm chacune.

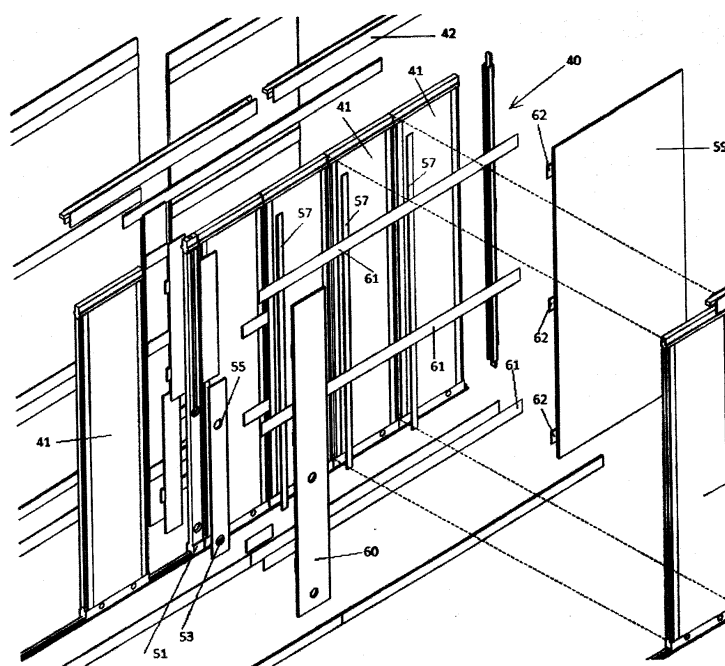


FIGURE 4.17 – Composition des cloisons CIMEDE - Finitions avec panneaux prépeints MDF [dl13]

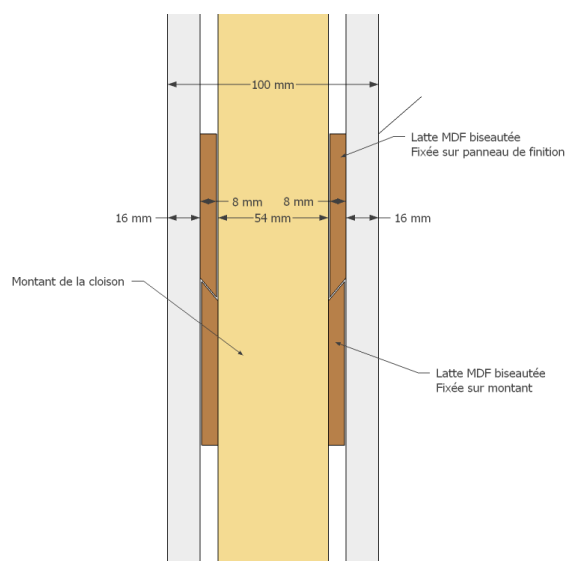


FIGURE 4.18 – Système d'accroche des panneaux de finitions sur les cloisons

4.2.4 Éléments de finition

D'autres éléments tels que les encadrements portes intérieures en MDF, les montants techniques nécessaires au passage des câbles électriques dans les cloisons, les jonctions

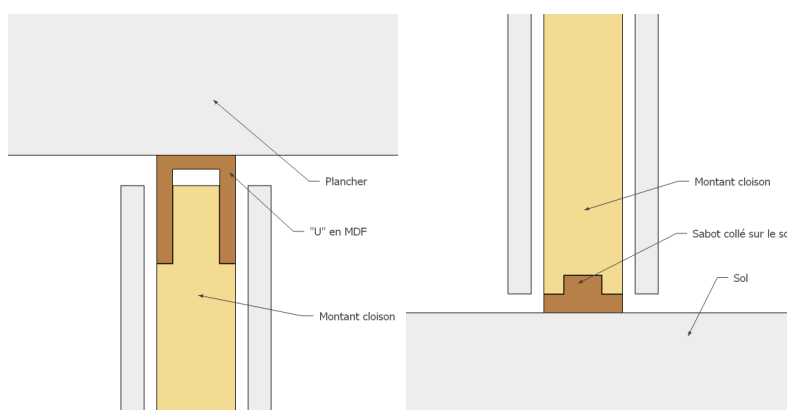


FIGURE 4.19 – Fixation supérieure des cloisons

FIGURE 4.20 – Fixation inférieure des cloisons

de coin entre deux cloisons perpendiculaires, etc. sont également issus de la production CIMEDE. Ces éléments sont produits au sein des Ateliers du Monceau et sont mis en place sur chantier lors du montage des cloisons.

En ce qui concerne les finitions intérieures, une option supplémentaire est disponible améliorant l'efficacité du changement de la finition interne des pièces de vie. Il s'agit de contre-cloisons disposées sur la face interne des murs de manière à optimiser l'évolutivité de la finition et, de surcroît, du bâtiment. Ces contre-cloisons ont la même morphologie que les cloisons, les seules différences résidant dans le fait qu'il n'y a pas de laine minérale et qu'il n'y a qu'une seule plaque de fibroplâtre VIDIWALL, disposée du côté intérieur du bâtiment, sur les contre-cloisons.

Chapitre 5

Méthodologie

Cette section reprend la manière dont les outils théoriques présentés supra ont été appliqués à l'analyse du système constructif CIMEDE et la manière dont l'analyse de ce dernier a été approchée.

5.1 Compréhension des biens produits

L'étape initiale lors de l'étude d'un système productif est la compréhension des biens vendus par l'entreprise. Dans le cadre de ce travail, il a été dans un premier temps nécessaire de bien comprendre la composition et les performances exigées des éléments structuraux CIMEDE vendus par l'Atelier de l'Avenir tout en consultant les documents techniques élaborés lors de la phase de conception du projet. Les résultats de cette première étapes ont été dévoilés dans le point 4, à la page 62. Sur base de la connaissance technique des biens vendus, il a été possible de commencer à analyser la chaîne de production.

5.2 Compréhension de la production CIMEDE

Après avoir pris connaissance des biens produits, l'étape suivante consiste à comprendre la chaîne de production de A à Z. Le premier but de cette étape est de visualiser correctement le cheminement des produits semi-finis à travers toute la chaîne, leur provenance et leur destination. Le second but de cette étape est de comprendre en quoi consiste chaque processus de transformation et leur agencement dans la chaîne. Pour cela, une visite des installations de l'entreprise, munis d'un carnet de notes et d'un appareil photo, s'avère nécessaire.

Sur base des interrogations mentionnées supra et de la visite de l'entreprise, une première esquisse sous forme de cartographie des flux de valeur doit être entreprise. Pour rappel, le but de la cartographie des flux de valeur est de déterminer les endroits où du temps est perdu. Comme il a été vu dans la théorie, du temps peut être perdu soit entre les processus (via des stocks), soit à l'intérieur même d'un processus (via une faible proportion de tâches ajoutant de la valeur par rapport à l'ensemble des tâches constituant le processus). Une série de zooms successifs doivent alors être effectués sur chaque processus de la chaîne de manière à cibler ce qui ajoute de la valeur dans le processus et ce qui n'en ajoute pas. Le schéma initialement réalisé, concernant le cas de CIMEDE, est illustré sur la figure 5.1, à la page 77.

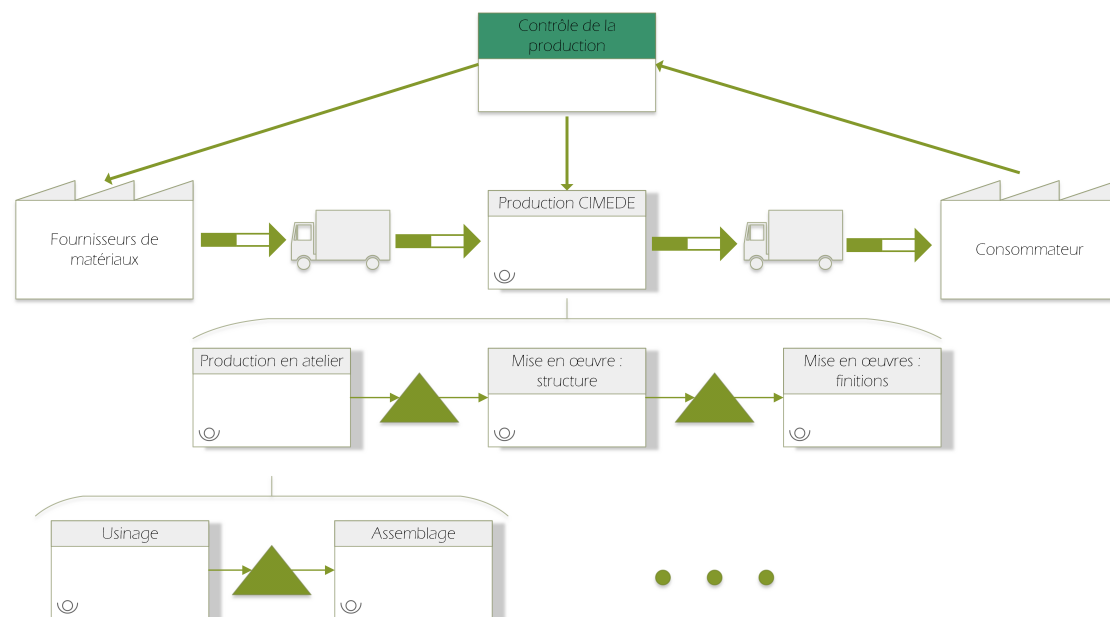


FIGURE 5.1 – Cartographie des flux de valeur initiale

Rapidement, certains macros-processus se démarqueront sur cette première représentation de la chaîne. Les données de production (L/T, VC/L, C/T et ressources) propres à chacun de ces macros-processus doivent être évaluées approximativement sur base du planning prévisionnel élaboré par l'Atelier pour connaître rapidement les ordres de grandeurs de ces données à ce stade de l'étude. De manière à affiner ces résultats, chacun des macros-processus doit être analysé plus précisément. Il faut cependant encore savoir ce qui doit être analysé. C'est pour cela qu'une réflexion préalable à propos de l'unité de production prise en compte doit être menée avant de débiter la mesure des temps de production.

5.3 Définition de l'unité de mesure

Il faut apporter une attention particulière à la détermination de l'unité de production. Comme le stipule la littérature, l'unité de production doit être la plus petite possible afin que, dans un premier temps, la production soit la plus fluide possible et que, dans un second temps, l'analyse de la production puisse être la plus précise possible.

D'autre part, de manière à pouvoir étudier la ligne de production dans son ensemble et à comparer les processus entre eux, il faut réfléchir à une unité de production standard à tous les processus. Il s'avère que l'unité de production qui semble la plus logique ne représente pas toujours l'unité la plus adéquate pour étudier la productivité du système productif. En effet, pour une entreprise produisant des pièces de voitures, comme le montre l'exemple de la figure 2.17, à la page 28, l'unité retenue pour l'analyse de la chaîne est la pièce de voiture produite. Nous aurions tendance à dire que pour une entreprise produisant des maisons, l'unité de base à prendre en compte doit être une maison. Cependant, en présence d'une entreprise complexe, produisant, assemblant et finissant elle-même un produit, tel que l'Atelier de l'Avenir, l'unité adéquate ne semble pas être la maison¹.

5.4 Production en atelier

5.4.1 Prise des temps

Le premier gros processus du système constructif est la production des éléments structuraux en atelier. Des fiches reprenant les temps de production doivent être élaborées. Ces fiches prennent la forme d'un tableau à double entrée avec, en ordonnée, la liste des processus et des sous-processus et, en abscisse, l'heure de début et de fin de la tâche, la durée, le nombre d'ouvriers nécessaires à la tâche, leur rôle ainsi que les remarques éventuelles à propos du processus étudié. Un exemple de fiche initialement conçue est illustré sur la figure 5.2, à la page 79. Il est évident que, en avançant dans l'étude, ces fiches subissent quelques modifications.

L'heure de début et de fin de chaque tâche sont notées et la soustraction des deux heures permet de déterminer le temps pris par chacune des opérations. En comparant l'heure de fin de la dernière tâche du précédent processus et l'heure de début de la première tâche du processus suivant, le temps de stockage du produit semi-fini entre les deux processus peut être déterminé.

1. L'explication numérique sera donnée dans la partie portant sur les résultats au point 6, à la page 84.

Processus	Sous-processus	Démarrage	Fin	Nbre ouvriers	Type ouvriers				Remarques
					Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	
Process 1	Sous-Process 1								
	Sous-Process 2								
Process 2	Sous-Process 1								
	Sous-Process 2								
Process 3	Sous-Process 1								
	Sous-Process 2								

FIGURE 5.2 – Exemple de fiche de prise de temps pour la production en atelier

5.4.2 Analyse des résultats

Afin de visualiser au sein même du processus les pertes de temps, un *flow process chart*, tel que celui représenté sur la figure 2.35, à la page 44, doit être réalisé pour chacun des processus présents sur la chaîne de production de l'Atelier.

Sur base des durées obtenues et de l'observation des *flow process chart*, le calcul des données de production (L/T, VC/T et C/T) peut être mené en vue de pouvoir analyser ultérieurement la chaîne de production dans son entièreté. Une cartographie des flux de valeur précise, reprenant ces données de production, peut alors être élaborée. Les données sont également encodées dans un tableur EXCEL reprenant l'entièreté des données de production de la ligne de manière à faciliter l'analyse globale du système.

Certaines conclusions propres à la production en atelier peuvent déjà être tirées à ce niveau.

5.5 Étude de la mise en œuvre : partie structure

5.5.1 Prise des temps

La prise de mesure des éléments assemblés se déroule également avec des fiches pré-établies dont le canevas est identique à celui présent sur la figure 5.2, à la page 79. Ces fiches relatent le déroulement du montage d'un bâtiment CIMEDE et sont remplies au fur et à mesure que le chantier avance. L'élaboration de l'agencement des phases de montage avant le chantier peut se réaliser en concertation avec les concepteurs du système constructif.

Les prises de temps des phases de montage se déroule également en notant seulement les heures de début et de fin des différentes tâches et en calculant a posteriori les durées des tâches sur base des heures relevées. Lors de cette étape d'analyse, les fiches de montage subissent également quelques modifications de manière à pouvoir compléter et rendre cohérent l'ensemble des données obtenues.

De manière à éviter de perdre un élément de l'exécution, un système de surveillance composé de 3 caméras IP et d'un système informatique adéquat a été déployé sur le chantier lors du montage. Les vidéos sont enregistrées sur un disque dur et leur consultation a posteriori permet de faciliter l'étude de la phase concernant la mise en œuvre sur chantier du système CIMEDE. La disposition de ces caméras, pour le cadre de travail, est visible sur la figure 5.3, à la page 80. Il est important d'avoir plusieurs angles de vue et surtout de filmer les endroits peu accessibles durant le chantier. C'est pourquoi, disposer une caméra en hauteur, comme il l'a été fait pour ce travail, représente un atout considérable.



FIGURE 5.3 – Disposition des caméras IP sur le chantier de l'Atelier de l'Avenir



FIGURE 5.4 – Moniteur de surveillance branché aux caméras IP

Les caméras ont été reliées à un moniteur de surveillance² aussi disposé sur le chantier de manière à également pouvoir visualiser en temps réel les phases de montage CIMEDE lorsque celles-ci ne sont pas observables facilement en cours de montage. Ce moniteur est illustré à la figure 5.4, à la page 80.

La disposition des caméras de surveillance pour le cas étudié est visible sur la figure 5.5, à la page 81³.

5.5.2 Analyse des résultats

Suite à la prise des temps, une phase d'analyse de l'exécution prend place. Dans un premier temps, une remise à jour des tableaux de prise de temps doit être réalisée de manière à compléter et rendre cohérentes les données obtenues. Ensuite, un *flow process*

2. Les photos du moniteur de surveillance (figure 5.4) et de la disposition des caméras (figure 5.3), dans le cas étudié, ont été prises avec plusieurs heures d'intervalles, ce qui explique la non-concordance des images. De plus, la caméra blanche, à droite de la figure 5.3, a été déplacée en cours de chantier afin d'affiner l'angle de vue.

3. Les caméras sont représentées par des ronds oranges.

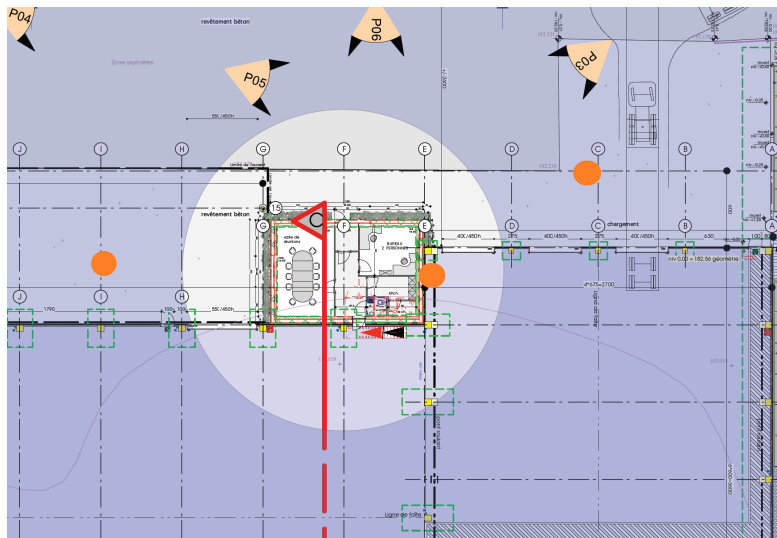


FIGURE 5.5 – Disposition des caméras de surveillance

chart modélisant le montage du bâtiment doit être établi afin de mettre en avant les pertes de temps internes, comme pour les processus de production.

Les données numériques ainsi récoltées sont également encodées dans le tableur EXCEL créé pour rassembler l'entièreté des données de production du système CIMEDE.

Des conclusions propres au montage sur chantier peuvent également déjà être tirées sur base des résultats obtenus notamment concernant la pose de certains éléments structuraux critiques.

5.6 Étude de la mise en œuvre : partie finitions

5.6.1 Prise des temps

La prise des temps des finitions se base aussi sur un relevé des heures de début et de fin des tâches constituant les processus relatifs aux finitions. Ces données sont transcrites dans des tableaux identiques à ceux mentionnés plus haut.

Il s'avère rapidement que les temps de mise en œuvre des finitions sont nettement plus conséquents que ceux concernant le montage de la structure. Dans le cas étudié, le planning n'était de plus que très peu respecté. C'est pourquoi des visites régulières sur le chantier⁴ sont nécessaires afin de suivre le plus près possible l'état d'avancement des

4. Tous les deux jours environ.

finitions.

Les finitions étant, dans le cas étudié, assurées par des corps de métier extérieurs, il est intéressant de les interroger pour connaître leurs heures de travail et le nombre d'hommes présents sur le chantier afin d'en déduire leur rendement et les durées de chacune des tâches relatives aux processus de finitions.

5.6.2 Analyse des résultats

Les processus de finitions étant moins réguliers que ceux de production ou de montage, un diagramme de GANTT, tel que celui illustré sur la figure 2.10, à la page 20, s'avère être un premier outil d'analyse primordial afin de bien comprendre l'enchaînement des tâches.

Ensuite, une cartographie des flux de valeur est élaborée pour le macro-processus concernant les finitions sur base de ce diagramme de GANTT. Les données de production peuvent alors être déduites et inscrites dans la cartographie.

5.7 Analyse globale du système

Les macros-processus étant modélisés, il reste à combiner le tout sur une seule et même cartographie des flux de valeur et de déterminer les stocks entre chacun de ces macros-processus.

Sur base de cette cartographie de l'état actuel du système constructif, une analyse peut être menée à bien afin de cibler les sources de gaspillage dans le système. Des pistes d'amélioration de la chaîne peuvent alors être évoquées sur base de cette représentation simplifiée du système.

5.8 Moyens d'optimisation

Des outils tels que les *kanban*, le LPS ou encore la méthode des 5S peuvent être employés dans la représentation future de la chaîne de production visant à répondre le plus radicalement possible aux sources de gaspillage.

5.9 Difficultés rencontrées dans le cas étudié

La difficulté rencontrée la plus importante réside dans le fait que, bien que la cartographie de flux de valeur s'applique à des lignes de production en régime établi, le cas étudié était clairement un système dans lequel le régime était transitoire étant donné la jeunesse de l'entreprise et de la mise en place de la production. En effet, cette dernière n'a débuté officiellement qu'au début du mois d'octobre 2012 alors que l'analyse du système constructif s'est déroulée à partir de février 2013, 4 mois seulement après le début de la production. Les résultats présentés au point 6, à la page 84, confirmeront la variabilité actuelle de la production de l'Atelier de l'Avenir. Pour parer à cette variabilité et pour fiabiliser le modèle, certaines hypothèses concernant les moyennes de temps de production ont été prises, notamment en ce qui concerne la partie relative à l'exécution, en concertation avec les employés de l'Atelier de l'Avenir. Chacune de ces hypothèses seront détaillées numériquement dans la partie reprenant les résultats de ce travail (point 6).

Par ailleurs, certains temps de production propres à une maison type⁵, n'étant pas disponibles étant donné le planning des productions en cours, certaines hypothèses à ce niveau ont dû également être prises en concertation avec les employés de l'Atelier. La pose de ces hypothèses ne s'est pas passée sans peine étant donné la variabilité de la production et de manière à conserver un modèle représentatif de la réalité.

Une autre difficulté a été due à la complexité du système qui se déroule autant en atelier que sur chantier. Il n'a dès lors guère été évident d'observer l'ensemble des tâches. Les raisons de cette difficulté sont le manque de régularité des processus d'une part et le déroulement simultané de plusieurs processus d'autre part. Une des solutions pour surmonter ce problème fut l'utilisation des caméras de surveillance et l'interrogation des ouvriers et des employés de l'Atelier a posteriori pour savoir ce qu'il s'était passé. Les caméras IP fonctionnant en réseau, la transmission de certaines images fut difficile se soldant par des vidéos peu fluides à certains moments.

Une dernière difficulté a été les grosses modifications de planning de production et de mise en œuvre sur chantier ainsi que les retards engendrés par les conditions climatiques des mois de février, mars, avril et mai de cette année. De plus, l'installation des caméras de surveillance ne s'est pas déroulée facilement avec ces conditions météorologiques, surtout pour la caméra située sur le toit du hall de production.

5. La maison type est le produit étudié dans ce travail et sa composition sera présentée au point 6, à la page 84

Chapitre 6

Résultats

6.1 Hypothèses de calcul

6.1.1 Objet de l'étude - Maison type

Le projet CIMEDE a pour objectif l'industrialisation de bâtiments. Ces bâtiments diffèrent selon les desiderata du client. L'Atelier de l'Avenir offre la possibilité de différencier les bâtiments de deux manières. Premièrement, comme cela a été présenté au point 4, à la page 62, la composition des éléments structuraux peut être diversifiée selon les performances exigées par le client. Deuxièmement, la morphologie du bâtiment peut être personnalisée, tout en respectant les dimensions maximales et minimales des éléments structuraux et une trame génératrice basée sur un multiple de 10 cm.

L'Atelier de l'Avenir a défini un modèle de base qui représentera a priori la majorité des ventes. De manière à pouvoir modéliser le plus fidèlement et le plus simplement la production CIMEDE, l'étude réalisée dans ce travail se basera exclusivement sur ce produit de base.

Le produit de base défini par L'Atelier de l'Avenir est une maison type unifamiliale, destinée au logement, de 90 m² répartis sur deux niveaux constituant un bloc de 3 logements, comme il est illustré sur la figure 6.1, à la page 85. Les dimensions d'un tel bâtiment sont reprises dans le tableau 6.1, à la page 85.

La configuration 3 du tableau 6.1, à la page 85, semble la plus intéressante d'un point de vue énergétique. En effet, un parallélépipède rectangle à base carrée offre une moins grande surface de contact avec l'extérieur qu'un parallélépipède rectangle à base rectangulaire, à volume identique. L'étude se portera donc sur une habitation dont les dimensions sont celles de la configuration 3 reprise dans le tableau 6.1, à la page 85. Par



FIGURE 6.1 – Batterie de 3 maisons types

Configuration	Longueur [m]	Largeur [m]	Superficie [m ²]
1	5	9	45
2	6	8	48
3	7	7	49

TABLE 6.1 – Dimensions d’un bâtiment destiné à un logement social

ailleurs, cette configuration offre également l’avantage d’éviter un renforcement en acier dans les planchers, pour autant que la couche de sable dans ces derniers soit diminuée, permettant également de faire chuter le coût du produit de base.

La figure 6.2, à la page 85, illustre un exemple d’arrangement intérieur d’un bâtiment dont les dimensions ont été mentionnées supra.



FIGURE 6.2 – Plans d’une maison type étudiée

La figure 6.3, à la page 86, illustre l'état de la maison avant le transport et la mise en œuvre sur chantier. Avant d'être acheminés sur site, les murs sont stockés de cette manière dans des magasins qui se situent en fin de chaîne de production. Les planchers sont stockés à même le sol l'un derrière l'autre dans le fond du hall de stockage.

La maison type ne comprend pas les options de composition décrites au point 4, à la page 62. Elle ne comprend pas non plus l'ajout de contre-cloisons sur les murs. Le bardage type sera un crépis sur l'entièreté de la surface du bâtiment et les revêtements de sol seront des chapes humides sur lesquelles un carrelage ou un lino, selon les désirs du client, pourra être disposé. Une ventilation mécanique sera bel et bien présente dans la maison type. L'habitation ainsi définie est composée des éléments préfabriqués repris dans le tableau 6.2, à la page 86.

Élément	Longueur [m]	Hauteur/Largeur [m]	Quantité
Murs extérieurs façades	7,5	3	6
Murs extérieurs mitoyens	7,5	3	2
Murs intérieurs (gaine technique)	2 et 0,5	3	4
Acrotères	8	0,6	4
Planchers	7	1,2	12
<i>Total</i>	/	/	28
Cloisons	0,6	2,5	60

TABLE 6.2 – Métré maison type

En ce qui concerne l'infrastructure, la maison type sera établie sur une fondation de type radier général posée sur un lit de gravier et de sable de manière à diminuer les coûts de terrassement du terrain.

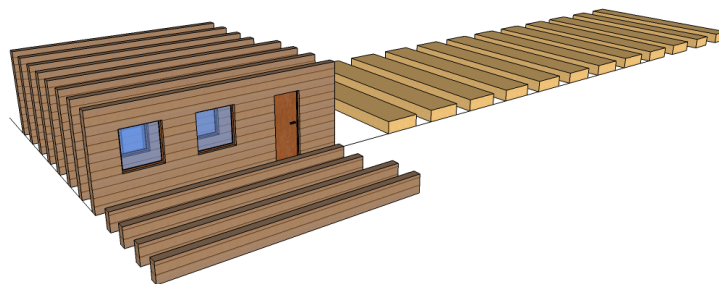


FIGURE 6.3 – Éléments préfabriqués d'une maison type avant montage

Enfin, les figures 6.4 et 6.5, respectivement à la page 87 et à la page 87, représentent une maison CIMEDE type montée et implantée dans un quartier résidentiel.



FIGURE 6.4 – Maison CIMEDE montée et implantée - Façade avant



FIGURE 6.5 – Maison CIMEDE montée et implantée - Façade arrière

6.1.2 Hypothèses propres à la production

Dans l'absolu, les Ateliers du Monceau s'occupe de tout ce qui est usinage des pièces et de la fabrication complète des cloisons. L'activité de l'Atelier de l'Avenir réside dans l'assemblage des éléments CIMEDE¹. Bien que cette distinction ne soit pas encore tout à fait nette à l'heure actuelle, ce travail se basera sur l'hypothèse que l'Atelier de l'Avenir commande des pièces usinées et des cloisons aux Ateliers du Monceau afin de simplifier la modélisation de la production.

L'exercice d'une cartographie des flux de valeur d'une industrie nécessite la détermination d'une unité de production. Cette unité, comme il est mentionné dans la théorie, doit être la plus petite possible afin que le flux de valeur tende le plus possible vers un flux continu.

1. Murs et planchers.

Les biens de consommation de l'Atelier de l'Avenir sont des maisons. D'un point de vue global, cette unité semble adéquate. Or, nous entendons bien que l'unité de production correspondant à une maison semble trop grande si nous voulons étudier précisément le flux de travail au sein de l'entreprise. Certains montants de murs ne sont pas encore usinés alors que des murs sont déjà assemblés et stockés dans les magasins de fin de chaîne attendant d'être acheminés vers le chantier (figure 6.6, à la page 88). La maison passe donc à travers plusieurs processus à la fois. Il est par conséquent impossible de calculer les C/T précis de chaque processus parmi lesquels transite la maison. Il faut donc trouver une unité de production ne subissant pas plusieurs processus à la fois. C'est pourquoi une unité plus petite sera déterminée suivant le niveau de précision de la cartographie.

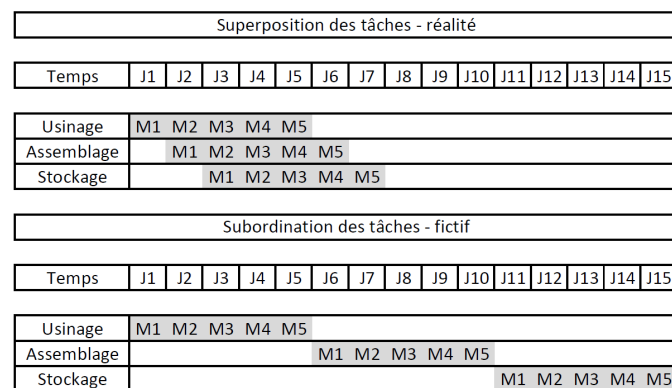


FIGURE 6.6 – Superposition des tâches vs. subordination des tâches

Par ailleurs, il apparaît facilement que les produits semi-finis ne subissent pas les mêmes temps de stockage après un processus. En effet, si le passage à un processus aval nécessite que n pièces soient produites, la première pièce du lot transformée passera plus de temps dans le stock que la dernière, comme l'illustre l'exemple de la figure 6.7, à la page 88. Il est donc impossible de déterminer précisément le temps de stockage d'une unité de production.

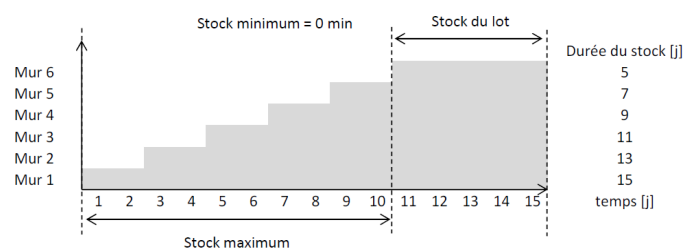


FIGURE 6.7 – Évolution du stockage au cours du temps

C'est pourquoi les durées de stockage ainsi que celles de certains processus, sujets à une variabilité, seront comprises dans un intervalle reprenant une valeur minimum et une valeur maximum.

D'autres hypothèses doivent être prises en compte comme la demande exacte du client, le nombre de jours de travail disponibles par an, le nombre d'heures de travail par jour, etc. Ces hypothèses sont répertoriées dans le tableau 6.3, à la page 89.

Nombre de jours de travail estimé par an	229 jours
Durée d'une pause (moyenne)	7,6 h
Nombre de pauses par jour	1
Nombre d'heures de travail estimé par an	1740 h
Nombre de minutes de travail estimé par jour	456 min

TABLE 6.3 – Hypothèses de durée de travail

En ce qui concerne la demande envisagée pour la réalisation de l'étude, trois notions différentes sont à distinguer. Dans un premier temps, il y a la demande réelle des consommateurs. Or, pour le moment, cette demande ne rencontre pas l'objectif financier de l'entreprise. Celui-ci a été calculé antérieurement sur base d'une demande hypothétique qui ne correspond pas à la demande actuelle. Enfin, il est bon de noter que le fabricant des machines d'assemblage, WEINMANN, affirme que la configuration et l'équipement dont jouit actuellement l'Atelier de l'Avenir permet de répondre encore à une autre demande. Ces différentes valeurs sont reprises dans la tableau 6.4, à la page 89.

Unité de production	180 m ² habitables		
Prévisions annuelles WEINMANN	50 unités		9000 m ² habitables
Prévisions business plan Atelier de l'Avenir	2013	12 unités	2160 m ² habitables
	2014	35 unités	6300 m ² habitables
	2015	48 unités	8640 m ² habitables
Perspectives commerciales CIMEDE actuelles	2013	10 unités	1800 m ² habitables
	2014	39 unités	7020 m ² habitables
	2015	35 unités	6300 m ² habitables

TABLE 6.4 – Hypothèses de production - Prévisions de la demande

L'étude de la productivité se basera sur l'objectif réel de la demande, i.e., le point de comparaison avec la productivité actuelle de la chaîne de production sera les 10 unités de 180 m² habitables pour l'année 2013. Cette production correspond à 1800 m² habitables, soit 20 maisons types de 90 m² habitables. Le *takt time* vaudra donc 11,5 jours/maison. Le détail de ce rythme de production est repris dans le tableau 6.5, à la page 90. **Un élément doit être produit environ toutes les 3 heures.**

6.2 Installations de la chaîne de production

Avant d'entrer dans la partie numérique des résultats, une description des installations est présentée. Sur la figure 6.8, à la page 90, est illustrée l'implantation des halls

Élément	Takt time	
	[j]	[min]
Maison	11,5	5244
Mur ou plancher	0,4	187

TABLE 6.5 – TT imposé par la demande du client

industriels des Ateliers du Monceau² et celui de l'Atelier de l'Avenir³.

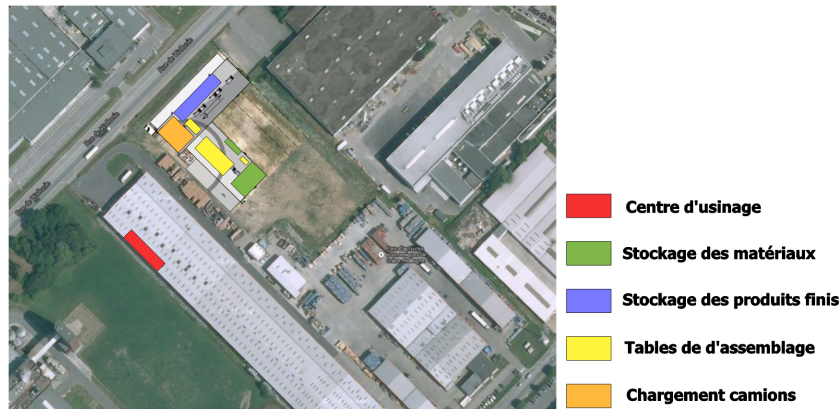


FIGURE 6.8 – Installations de la chaîne de production CIMEDE

Des photos du centre d'usinage et des tables de production ainsi que du pont multifonction réalisant les fixations des différents panneaux des éléments structuraux CIMEDE sont présentées respectivement aux figures 6.9 et 6.10, à la page 91. Les tables de production visibles sur ces photos sont des tables dites "Papillons" : les deux tables se lèvent et se font face de manière à pouvoir retourner les éléments structuraux CIMEDE en cours d'assemblage. La table 3 coulisse latéralement de manière à pouvoir récupérer la structure dans le prolongement de la table 2 et de pouvoir revenir dans l'axe du pont multifonction.

La zone réservée au chargement des camions et des magasins de stockage des produits finis ainsi que de la table levante permettant de placer les éléments structuraux dans les magasins sont présentées respectivement aux figures 6.11 et 6.12, à la page 91.

Une vue en plan de l'organisation intérieure du hall de l'Atelier de l'Avenir est également illustrée sur la figure 6.13, à la figure 92.

2. Hall comprenant le centre d'usinage.

3. Hall comprenant la majeure partie de la chaîne de production CIMEDE.



FIGURE 6.9 – Centre usinage - AdM - WEINMANN WBZ 160



FIGURE 6.10 – Tables d'assemblage et pont multifonction - WEINMANN WBZ 120



FIGURE 6.11 – Zone de chargement des ca-mions



FIGURE 6.12 – Zone de stockage produits-finis et table levante

6.3 Vue globale du système - état actuel

Comme présenté au point 5.2, à la page 76, le système constructif CIMEDE peut rapidement se décomposer en 3 sous-processus importants. Il s'agit premièrement de la **Production en Atelier**, comprenant l'assemblage des murs et des planchers, deuxièmement de la **Mise en œuvre sur chantier : Partie Structure** et troisièmement de la **Mise en œuvre sur chantier : Partie Finitions**, comprenant autant les finitions extérieures qu'intérieures du bâtiment. Ces 3 macros-processus sont illustrés sur la figure 6.14, à la page 93. En parallèle du processus consacré à la production en atelier, un processus relatif à la préparation du chantier prend place. Ce dernier comprend les tâches relatives au terrassement du terrain, à l'installation du système d'égouttage ainsi qu'à l'exécution de la dalle sur sol servant de fondation au bâtiment. Le transport sur chantier

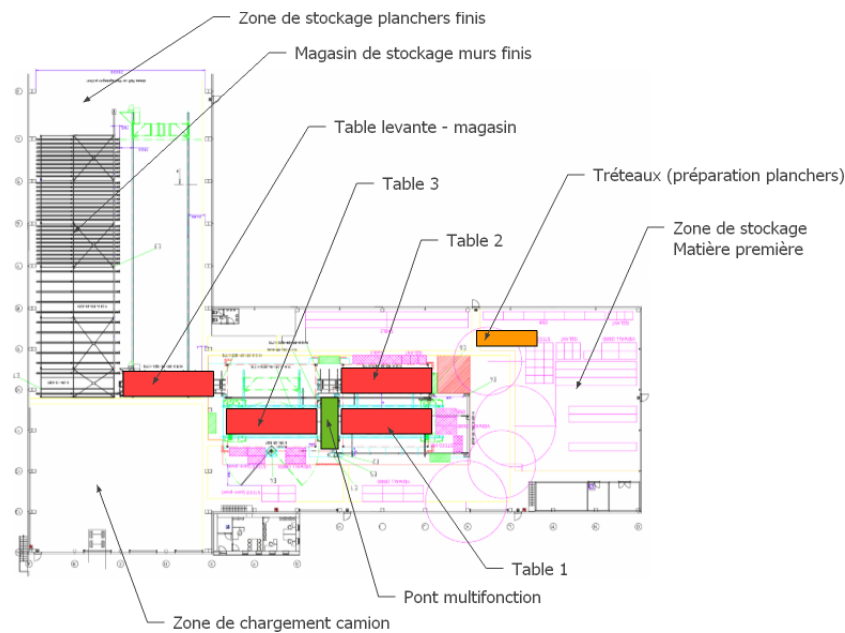


FIGURE 6.13 – Vue en plan des installations de la ligne de production CIMEDE

représente également un processus à part entière dans l'analyse des flux de valeur au sein de la ligne de production étudiée. La donnée reprise sur cette illustration est le TT calculé sur base des perspectives commerciales actuelles de l'Atelier de l'Avenir correspondant à la demande actuelle du client. En vue d'une production au plus juste, tous les processus de la chaîne devront donc avoir un C/T tendant vers ce TT rythmant la production et les stocks intermédiaires devront tendre à disparaître.

Le contrôle de la production récolte actuellement, comme dans une production traditionnelle, les informations relatives aux exigences du client, programme la production des différents éléments structuraux et réalise les commandes auprès des fournisseurs.

D'un premier abord, le L/T total d'une maison sera donc la somme du temps d'attente de la fourniture des matériaux⁴, du temps de production des éléments structuraux, du temps nécessaire au transport et au montage de ces derniers ainsi que du temps nécessaire aux finitions du bâtiment.

Chacun de ces macros-processus va être étudié plus précisément dans la suite de ce travail afin d'en déduire les données de production principales⁵ de chaque processus.

4. Dans le pire des cas.

5. C/T, L/T et VC/T.

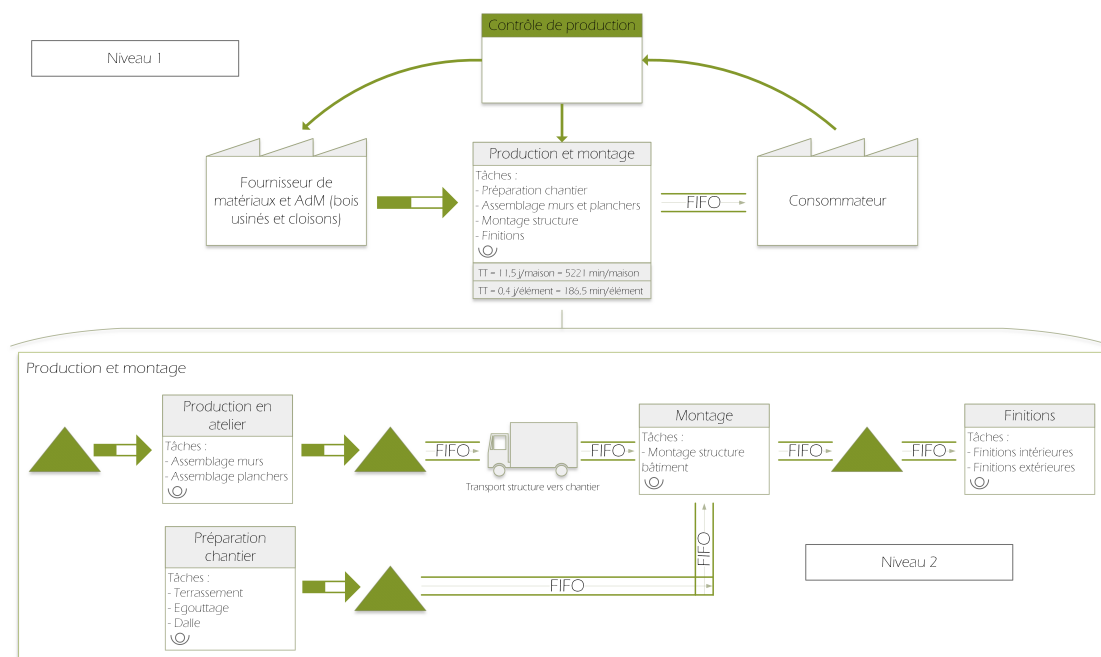


FIGURE 6.14 – Cartographie des flux de valeur initiale du système constructif CIMEDE

6.4 Production en atelier

6.4.1 Approvisionnement de la ligne d'assemblage

L'approvisionnement de la chaîne de production de l'Atelier de l'Avenir provient de 3 sources différentes. Premièrement, les matériaux constituant les éléments CIMEDE ne nécessitant pas d'usinage préalable, tels que les plaques d'OSB, de VIDIWALL, de STEICO, la laine minérale, les membranes d'étanchéité, etc. sont fournis directement par les différents fabricants. En ce qui concerne les structures en bois des éléments structuraux⁶, les bois sont commandés par les Ateliers du Monceau et l'Atelier de l'Avenir passe une commande de bois usinés auprès des Ateliers du Monceau. Il en va de même pour les cloisons CIMEDE. Les matériaux constitutifs des cloisons sont fournis aux Ateliers du Monceau qui fabriquent les cloisons et l'Atelier de l'Avenir commande des lots de cloisons aux Ateliers du Monceau.

6. KVH pour les murs et BLC pour les planchers

Approvisionnement : matériaux

Le tableau 6.6, à la page 94, reprend les principaux matériaux à commander pour la fabrication des éléments CIMEDE ainsi qu’une approximation de leur délais de livraison. Ces derniers devront être intégrés dans le temps d’attente du client suite à sa demande.

Matériaux	Délais de livraison [j]	Délais de livraison [min]
Membrane étanchéité eau	5	2280
Membrane étanchéité air	5	2280
Fixations métalliques	10	4560
Isolation KNAUF NATUROLL	10	4560
Pare pluie STEICO UNIVERSAL	5	2280
Panneaux OSB	20	9120
Plaques de de fibroplâtre VIDIWALL	5	2280
<i>Maximum</i>	20	9120

TABLE 6.6 – Approvisionnement en matière première

Approvisionnement : bois usinés

Les temps d’usinage pour les murs⁷ et les planchers⁸ CIMEDE sont repris dans le tableau 6.7, à la page 94.

Élément	C/T [min]
Mur	60
Plancher	76
<i>Moyenne</i>	68

TABLE 6.7 – Temps d’usinage des murs et des planchers CIMEDE - AdM

Les temps de stockage lors de l’usinage dans les Ateliers du Monceau ne sont ici pas pris en compte étant donné que le stockage n’est considéré dans cette analyse qu’à partir du moment où les bois entrent dans le système productif de l’Atelier de l’Avenir.

7. Un détail de l’usinage d’un mur est repris dans l’annexe B, à la page 149 .

8. Le temps d’usinage des planchers n’a pu être mesuré. Il représente donc une approximation en concertation avec l’Atelier de l’Avenir.

Approvisionnement : cloisons

Les temps de fourniture des cloisons⁹ des Ateliers du Monceau à l'Atelier de l'Avenir sont repris dans le tableau 6.8, à la page 95.

Processus	Élément	C/T [min]	L/T (60 éléments) [min]
Usinage	Cloison	9	538
Assemblage	Cloison	15,5	927
<i>Total</i>	Cloison	24,5	1465

TABLE 6.8 – Temps de production des cloisons CIMEDE - AdM

L'assemblage des cloisons ne requiert qu'une seule personne pour l'ensemble des processus. Le temps d'assemblage peut donc diminuer de moitié dans le cas où un second ouvrier participe à l'assemblage des cloisons. Le temps total de production des cloisons serait dès lors de **1001,5 minutes** ce qui correspond environ à deux journées de travail.

Approvisionnement : bilan

La VSM correspondant à la fourniture des matières premières de la chaîne d'assemblage de l'Atelier de l'Avenir est représentée sur la figure 6.15 à la page 96. On peut remarquer sur la VSM qu'il n'est pour le moment pas vraiment possible de comparer les processus d'approvisionnement entre eux étant donné que le colisage des fournitures n'est pas identique et que ces dernières n'interviennent pas toutes au même endroit sur la chaîne de production. La seule conclusion qu'il soit possible de tirer est que le L/T d'une maison depuis la conception jusqu'à la réception du bâtiment sera au moins égal au temps maximum des processus d'approvisionnement, i.e., 4 semaines¹⁰

La comparaison des C/T de l'approvisionnement des cloisons et des matériaux nécessaires à la fabrication d'une maison et du TT est reprise sur la figure 6.16, à la page 96. Il ressort de cette comparaison que la confection des cloisons pour une maison type nécessite moins de temps que celui octroyé par le client. Par contre, les fournisseurs de matériaux ne peuvent respecter ce TT. De manière à respecter la demande du client, l'Atelier de l'Avenir devra commander des matériaux pour la confection de deux maisons types toutes les 4 semaines générant ainsi des stocks et du gaspillage inévitablement. Notons que ces 4 semaines de délais ne sont valables que pour les panneaux OSB¹¹. Profiter des délais de livraison plus courts des autres matériaux permet de limiter ce stock de matériaux.

9. Des tableaux détaillés de l'usinage et de l'assemblage des cloisons CIMEDE sont repris dans l'annexe B, à la page 149.

10. Dans le pire des cas, si on fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de stock de matériaux sur la ligne de production.

11. Comme le mentionne le tableau 6.6, à la page 94

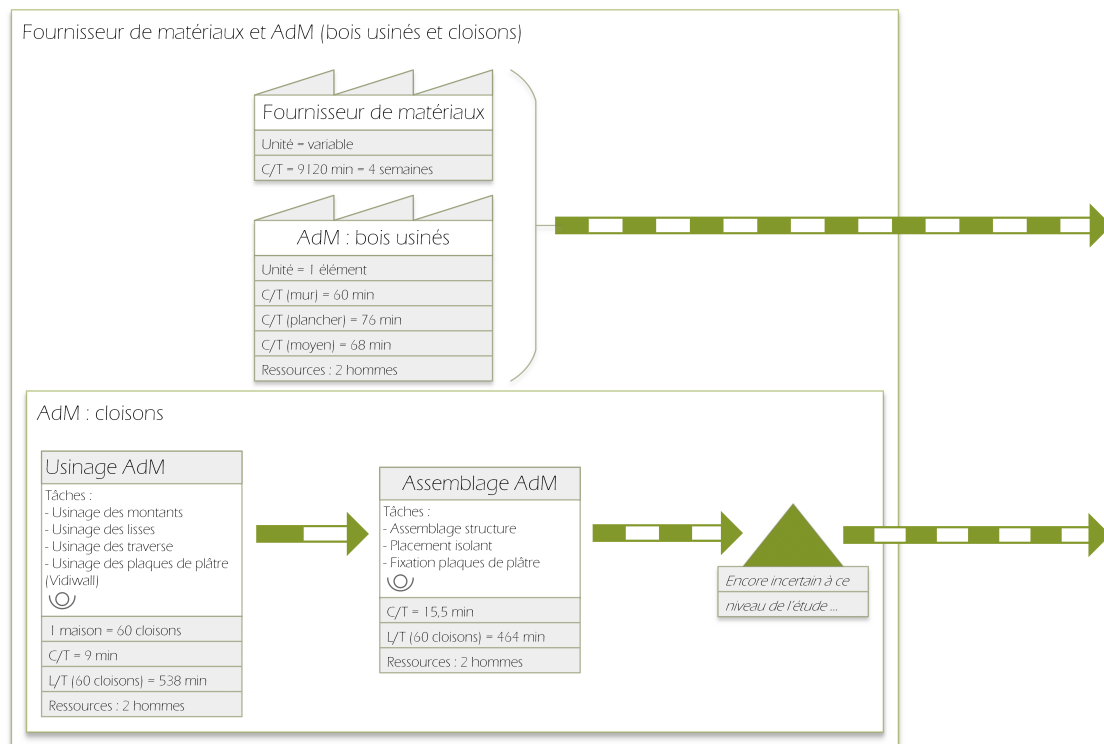


FIGURE 6.15 – VSM du processus relatif au fourniture de la ligne d'assemblage

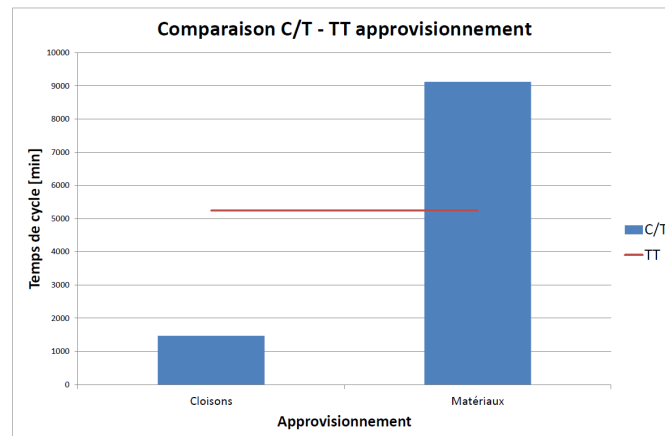


FIGURE 6.16 – Comparaison des C/T de l'approvisionnement avec le TT pour une maison entière

En ce qui concerne l'approvisionnement des bois usinés, le C/T s'élevant en moyenne à 68 minutes par élément structurel est bien en dessous du TT qui s'élève à 187 minutes. L'approvisionnement des bois usinés occasionnera donc inévitablement du stockage si

l'usinage se déroule de manière continue. Or, l'approvisionnement des bois usinés se déroule de manière discontinue limitant le stock à 3 éléments structurels usinés. Ce stock sera illustré ultérieurement.

6.4.2 Production des murs

La production est assurée par les ouvriers de l'Atelier de l'Avenir qui applique les consignes du chef de production et du responsable de production. La VSM relative à la production des murs CIMEDE est illustrée sur la figure 6.17, à la page 97. Un détail des temps de production est repris dans l'annexe B, à la page 149.

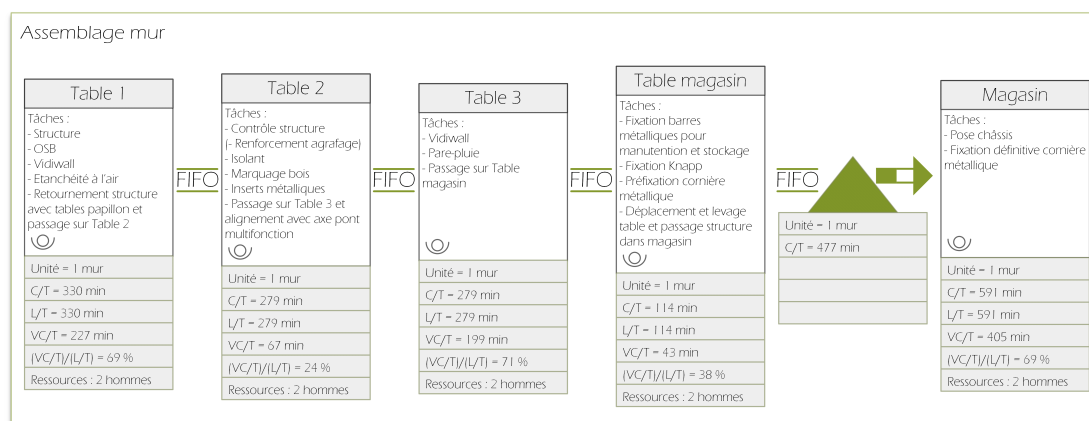


FIGURE 6.17 – VSM du processus relatif à la production des murs CIMEDE

Les premières constatations que nous pouvons faire sur cette représentation est le fait qu'il n'y a pas de lieux de stocks représentés entre les processus utilisant les tables de production. En réalité, les produits semis-finis stockés résident sur les tables et monopolisent donc l'espace de travail avant de passer sur la table suivante. Le temps de stockage est alors introduit dans le C/T du processus, ce qui explique les rapports $(VC/T)/(L/T)$ relativement faibles, notamment celui de la table 2. Insérer des stockages entre les processus voudrait dire que dès que la transformation d'un mur est terminée sur une table, celui-ci libère l'espace de travail.

Les autres raisons des faibles pourcentages du rapport $(VC/T)/(L/T)$ des processus sont des déplacements importants des ouvriers autour des tables et le manque d'effectifs sur la chaîne ainsi que le déséquilibre des C/T des processus forçant les ouvriers à devoir gérer plusieurs processus simultanément et n'optimisant ainsi pas leur travail.

De plus, on peut remarquer que les C/T des processus consécutifs décroissent. En effet, les lieux de stockage étant les lieux de travail¹², il est nécessaire que le C/T du

12. Les tables de production.

processus $n-1$ soit au moins égal au C/T du processus n ¹³. Il n'en est cependant pas de même pour le dernier processus de la chaîne se déroulant dans les magasins de stockage dans lesquels plusieurs murs peuvent être stockés simultanément.

Nous pouvons aussi remarquer les liens FIFO¹⁴ entre les processus. La taille des produits en cours de transformation étant de grande taille, il n'est pas anodin de rencontrer ce genre de liaison marquant le fait que le premier mur sorti du processus amont sera le premier consommé par le processus aval.

Il faut également noter que tous les murs ne doivent pas être munis de châssis, notamment les murs mitoyens. Le L/T est donc ici un peu surestimé pour ces murs. Dans un souci de clarté du travail, nous considérerons que tous les murs doivent passer par le processus d'installation des châssis et ces valeurs seront conservées.

Le processus global d'assemblage des murs est illustré sur la figure 6.18, à la page 98. Le calcul du temps de cycle et du *lead time* se déroule comme suit : le C/T d'un processus correspond au maximum des C/T des sous-processus constituant le processus¹⁵, tandis que le L/T du processus correspond à la somme des L/T des sous-processus constituant le processus¹⁶, tout comme pour le temps de création de valeur.

$$C/T = \max(C/T_i) \quad (6.1)$$

$$L/T = \sum_{i=1}^n L/T_i \quad (6.2)$$

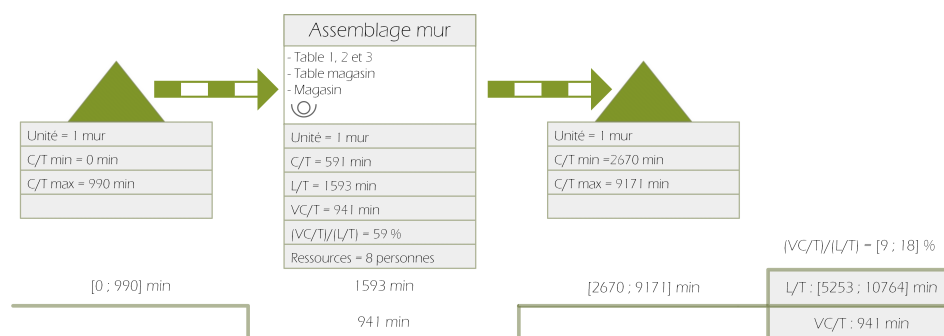


FIGURE 6.18 – Processus global relatif à la production des murs CIMEDE

13. Voir annexe B, page 149.

14. First-in,First-out

15. Equation 6.1, page 98.

16. Equation 6.2, page 98.

Avant et après son assemblage, le mur est dans un stock. Nous pouvons voir qu'il y a une variabilité dans le stock. Avant l'assemblage, les bois usinés sont acheminés dans le hall de l'Atelier de l'Avenir par lot à raison de 4 murs par trajet. Le temps de stock du premier mur consommé par la chaîne est nul, tandis que le temps d'attente du dernier mur usiné du lot fourni sera de $3 \times C/T_{\text{processus } 1}$ ce qui équivaut à 990 minutes.

A la fin de la chaîne, le premier mur doit attendre que le reste de la maison soit produit¹⁷ avant d'être acheminé sur chantier. Ce temps de stock vaut donc :

$$C/T_{\text{stock}} = \frac{12}{2} \times C/T_{\text{prod plancher}} + 11 \times C/T_{\text{prod mur}} = 6 \times 445 + 11 \times 591 = 9171 \text{ min} \quad (6.3)$$

Il y a 28 éléments composant une maison type, dont 12 planchers¹⁸, 8 murs principaux, 4 petits murs constituant la gaine technique et 4 acrotères. Considérer un temps de production pour un petit mur ou un acrotère égal au temps de production d'un mur principal semble excessif étant donné les différences de dimensions et de quantité de matériaux constituant les deux éléments. C'est pourquoi, afin de rendre la modélisation la plus fiable possible, nous considérerons que la production de 2 acrotères équivaut à la production d'un mur principal en terme de temps. Il en va de même pour la production de 2 petits murs. Une maison CIMEDE est donc constituée de l'équivalent de 12 murs principaux, ce qui explique le second terme de l'équation ci-dessus.

Le dernier mur arrivé dans le magasin ne doit attendre que la production des planchers, soit 2670 minutes.

La répartition du temps nécessaire à la fabrication d'un mur est reprise sur la figure 6.19, à la page 100. Cette répartition est basée sur le *flow process chart* de la production d'un mur qui se trouve dans l'annexe D, à la page 165. On peut apercevoir que seulement 45% du temps est utilisé pour ajouter de la valeur aux murs. Nous pouvons voir également que seulement 3% du temps est gaspillé inévitablement, du moins sans modifier la conception de la chaîne de production. Cette observation permet de dire qu'en améliorant le processus de production, il est possible de diminuer au moins de moitié le temps de production des murs CIMEDE.

Les figures 6.20 et 6.21, à la page 100, illustrent un mur en cours de production au sein de l'Atelier de l'Avenir.

17. Les murs sont produits avant les planchers dans le système constructif CIMEDE.

18. Dont deux sont produits en parallèle. La production des planchers est expliquée au point 6.4.3, à la page 100.

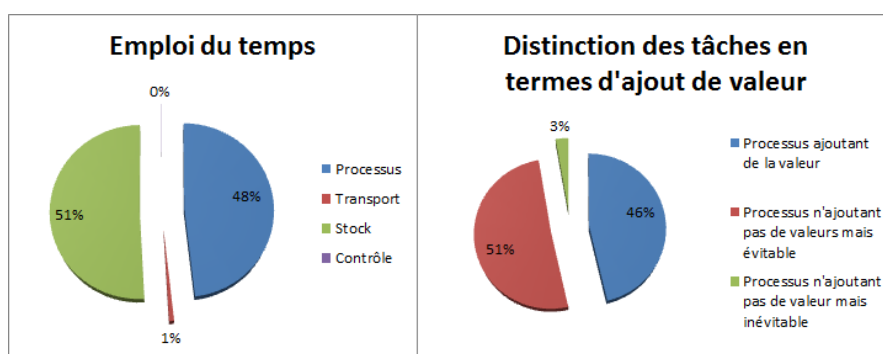


FIGURE 6.19 – Répartition du temps nécessaire à l'assemblage d'un mur



FIGURE 6.20 – Assemblage de la structure d'un mur sur la table 1

FIGURE 6.21 – Déplacement de la table 3 vers l'axe du pont multifonction

6.4.3 Production des planchers

La VSM relative à la production des planchers est illustrée sur la figure 6.22, à la page 101. Ces données sont détaillées dans l'annexe B, à la page 149.

La première remarque à effectuer est le fait que l'unité de production est ici de 2 éléments. En effet, les planchers faisant 1,20 m de large, deux éléments peuvent être alors disposés et assemblés en parallèle sur les tables d'assemblages¹⁹.

Tout comme pour les murs, il n'y a pas de stocks entre les processus utilisant les tables de production. Un seul stock est présent sur la chaîne. Il se situe entre le premier et le second processus. En effet, dès que les solives de deux planchers sont préparées, elle sont stockées ailleurs que sur les tréteaux avant d'être assemblées sur la table 1.

19. Les planchers sont fixés entre eux temporairement avec des barres en acier afin de faciliter la manutention des éléments.

Comme pour les murs, on peut remarquer que les rapports $(VC/T)/(L/T)$ sont relativement bas. Les raisons sont identiques à celles énoncées dans le cas des murs.

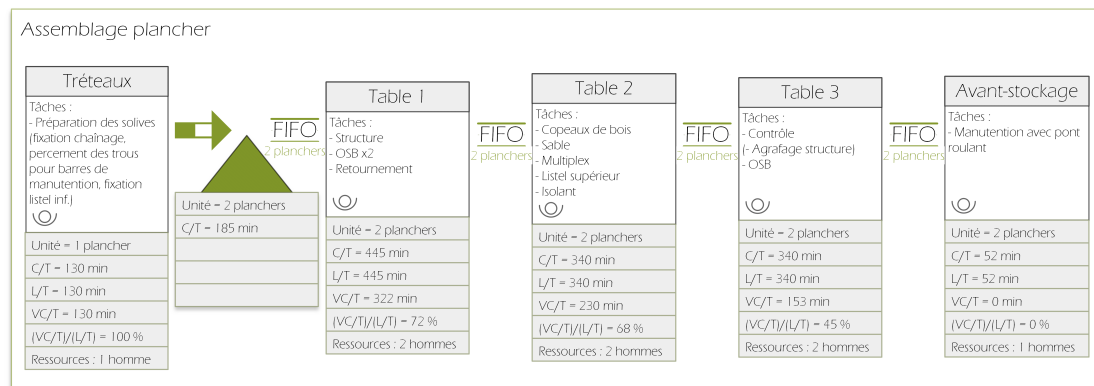


FIGURE 6.22 – VSM du processus relatif à la production des planchers CIMEDE

Le processus relatif à la production des planchers est repris sur la figure 6.23, à la page 101. Nous pouvons y voir un stock avant et après la chaîne de production. Le premier stock est dû au fait que les bois usinés sont fournis par lots de 4 planchers. Le dernier plancher à être consommé par le premier processus de la ligne devra donc attendre $3 \times C/T_{\text{processus 1}}$ soit 390 minutes. Par contre, en fin de chaîne, le temps de stock des planchers varie entre 0, pour le dernier plancher arrivé, et $5 \times C/T_{\text{prod plancher}}$ qui est égal à 2225 minutes.

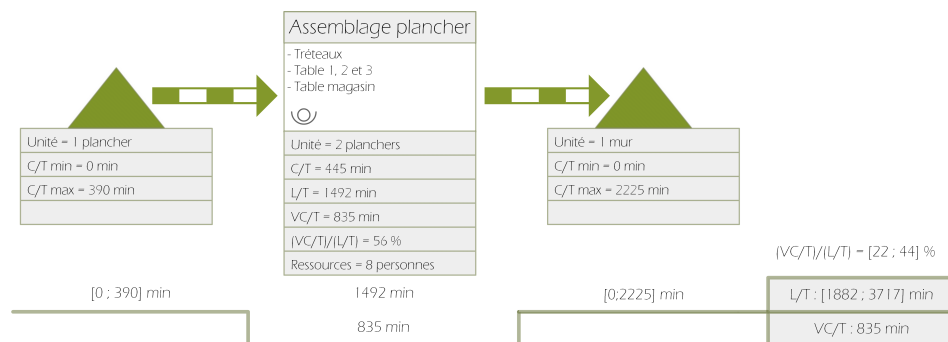


FIGURE 6.23 – Processus global relatif à la production des planchers CIMEDE

En ce qui concerne la répartition du temps utilisé pour produire les planchers, on remarque sur la figure 6.24²⁰, à la page 102, que la proportion du temps ajoutant de la valeur reste assez faible et que la proportion du temps n'ajoutant pas de valeur inévitablement reste également assez faible. Cette constatation permet de mettre en avant l'intérêt

20. Cette répartition a été également calculée sur base du *flow process chart* consultable dans l'annexe D, à la page 165.

de l'application du *lean* de manière à réduire ces temps de stockage et d'optimiser ainsi la production.

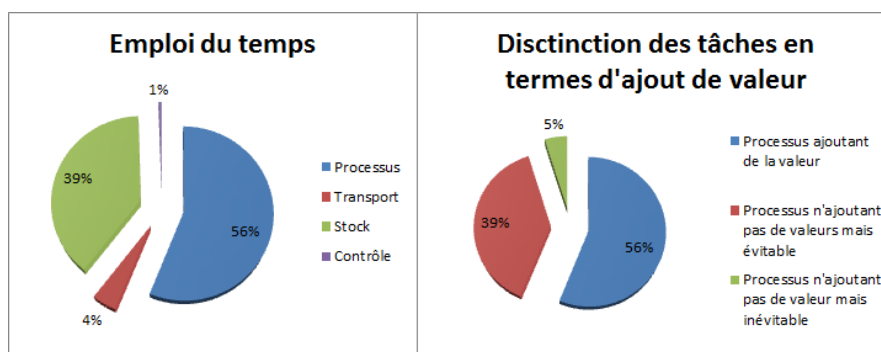


FIGURE 6.24 – Répartition du temps nécessaire à l'assemblage de 2 planchers

Les figures 6.25 et 6.26, à la page 102, illustrent des planchers en cours de production.



FIGURE 6.25 – Préparation des solives de plancher sur les tréteaux

FIGURE 6.26 – Remplissage d'isolant de deux planchers en parallèle sur la table 2

6.4.4 Bilan de la production

La figure 6.27 à la page 103, reprend une comparaison entre les C/T des processus correspondant à la production des murs et des planchers CIMEDE²¹. et du TT déterminé au point 6.1.2, à la page 87. Nous pouvons de premier abord remarquer qu'en général, la production des murs prend plus de temps que celle des planchers. Ceci est dû à la complexité plus importante des murs par rapport à celle des planchers. Par ailleurs,

21. Le C/T de la production des planchers repris ici vaut la moitié du C/T calculé précédemment au point 6.4.3, à la page 100, étant donné que le TT est déterminé pour un élément structural seulement.

nous pouvons constater le déséquilibre entre les C/T des processus, forçant ces derniers à diminuer le temps d'ajout de valeur étant donné que le stockage des éléments monopolise les espaces de travail. De plus, le C/T du dernier processus de production des murs est beaucoup plus important. C'est ce dernier qui conditionne le rythme de production des éléments structuraux étant donné que le C/T du processus global est égal au maximum des C/T des sous-processus composant le processus global, comme le stipule pour rappel l'équation 6.1, à la page 98.

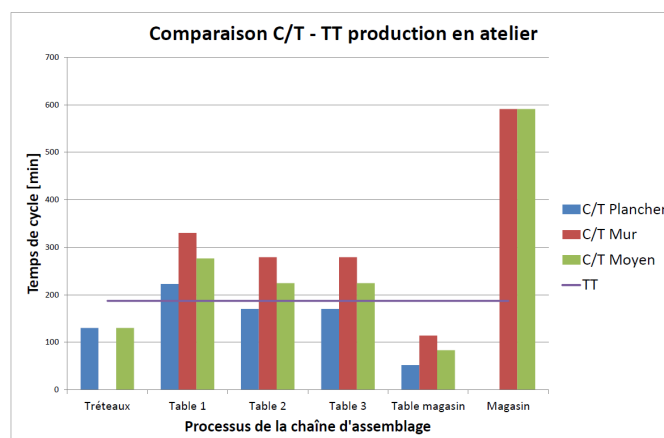


FIGURE 6.27 – Comparaison des C/T des processus de la chaîne de production et du TT

De manière à tendre vers la demande du client, il est primordial d'intervenir dans un premier temps sur le dernier processus de la chaîne de production des murs²². Ensuite, il faut intervenir sur les processus de production de manière à diminuer les temps de stockage.

6.5 Préparation du chantier

La figure 6.28, à la page 104, illustre la préparation du terrain avant de pouvoir accueillir une maison type CIMEDE. En réalité, le système constructif CIMEDE n'impose pas ce type de fondation particulièrement. Mais, dans la modélisation présente, le choix de la dalle sur sol a été motivé par le fait que ce type de fondation sera a priori celui le plus utilisé ultérieurement dans les constructions CIMEDE étant donné son coût et sa complexité moindre²³.

La figure 6.29, à la page 104, illustre la VSM de la préparation du chantier assurée par des maçons de l'entreprise Wust.

²². Fixation définitive de la cornière de support des planchers et installation des châssis dans la structure.

²³. Discussion réalisée avec le responsable de production à ce sujet

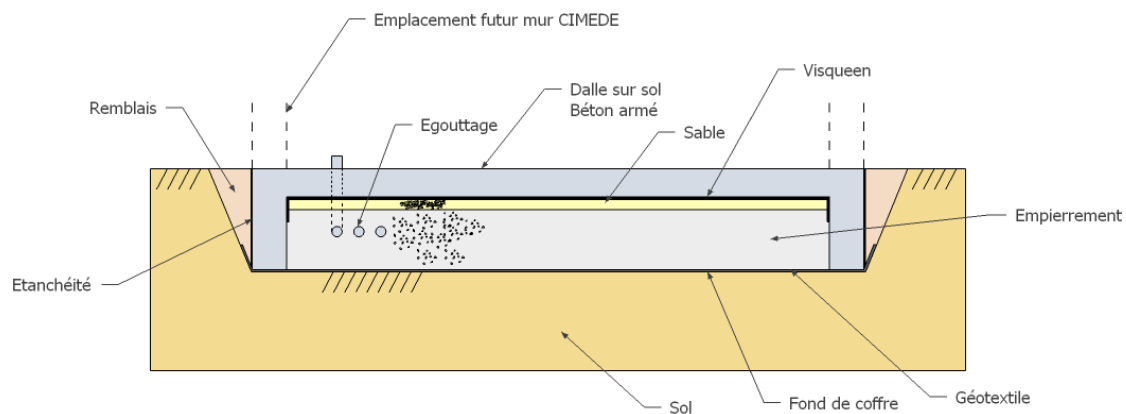


FIGURE 6.28 – Coupe de la préparation du chantier avant le montage de la structure

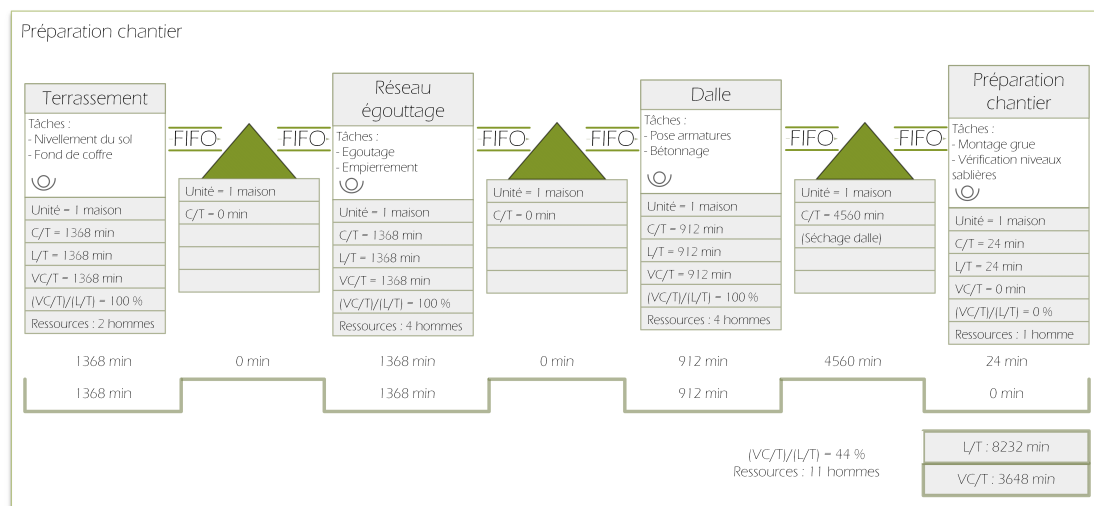


FIGURE 6.29 – VSM de la préparation du terrain

Dans un premier temps, il faut préciser que les L/T repris sur la VSM correspondent à des approximations élaborées en concertation avec le responsable de la production de l'Atelier de l'Avenir étant donné qu'une mesure sur chantier n'a pas été possible.

On peut constater que les liens entre les processus de la préparation du terrain sont également des liens FIFO. En effet, l'unité de production est ici également de grande taille et n'est pas standardisée : tous les terrains ne sont pas identiques. On peut observer également que les C/T des processus sont nettement plus importants que ceux correspondant à la production en atelier. Ceci s'explique aisément par le fait que les C/T sont fonction de la taille des unités de production.

Par ailleurs, les VC/T correspondent au L/T dans cette modélisation. En réalité,

il n'en est rien car, sur chantier, comme la théorie le précise, il y a toujours du gaspillage. Etant donné qu'une mesure sur chantier n'a pas été possible, il a été décidé ici de considérer que la rentabilité des ouvriers était de 100%. On verra plus loin que ce choix n'influence en rien les résultats finaux de l'analyse.

La figure 6.30, à la page 105, illustre la comparaison entre les C/T des processus de la préparation du chantier et du TT. On peut remarquer que les C/T sont nettement inférieurs au TT. De plus, il existe une grande différence entre le C/T des 3 premiers processus et du C/T du séchage de la dalle. De manière à diminuer le nombre d'hommes sur chantier et à équilibrer les C/T des processus, il serait intéressant de grouper les 3 premiers processus²⁴ et d'obtenir ainsi un seul processus regroupant les tâches de terrassement, d'égouttage et de coulage de dalle avec un C/T de 3648 minutes.

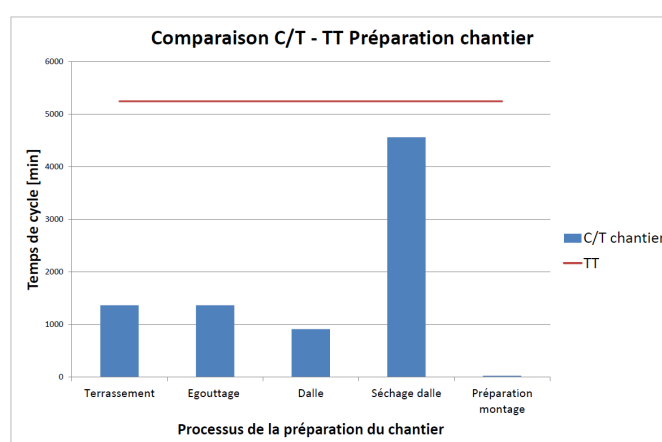


FIGURE 6.30 – Comparaison des C/T des processus relatifs à la préparation du chantier et du TT

6.6 Montage de la structure

6.6.1 Contexte

Les mesures des temps de montage sur site des éléments structuraux CIMEDE ont été réalisées durant la construction des bureaux de l'Atelier de l'Avenir, à Grâce-Hollogne, dont une illustration apparaît sur la figure 6.31, à la page 106.

Cette construction est la toute première du système constructif CIMEDE²⁵, elle

24. Le groupement des processus est illustré dans la théorie sur la figure 2.31, à la page 39.

25. Mis à part la construction d'un module test de petites dimensions, réalisée en 2011, sur le site de l'entreprise, dont l'étage a été ensuite démonté pour subir des tests de résistance au feu à l'Université de Liège.



FIGURE 6.31 – Bureaux de l'Atelier de l'Avenir - Fin du gros-œuvre

s'est déroulée dans des conditions plus ou moins expérimentales. D'une part, toutes les conditions étaient réunies pour mener à bien le projet : météo, personnel ouvrier, moyens de vérification, etc. D'autre part, les éléments structuraux étaient encore entachés de certains défauts et les monteurs manquaient d'expérience et d'automatismes²⁶

Il faut de plus préciser que cette première construction ne s'est pas déroulée exactement comme la modélisation infra le décrit. En effet, certains processus ont été intervertis, certains se sont déroulés simultanément, d'autres pas, etc. Cependant, mis à part les dimensions des éléments structuraux et du bâtiment, la conception des bureaux de l'Atelier de l'Avenir est tout à fait identique à celle du bâtiment type de 90m² étudié ici. La modélisation réalisée tente donc de représenter le plus fidèlement possible le déroulement d'une construction telle qu'elle devrait se dérouler dans la réalité.

Une dernière remarque concernant le contexte de la prise de mesures des temps d'exécution sur chantier est que, pour des raisons de planning, ces mesures ont été prises avant celles de production. Les éléments observés lors de la production et lors du montage sur chantier n'ont donc pas été les mêmes. Or, ceci ne pose aucun soucis étant donné le concept même de l'industrialisation et de la standardisation des éléments.

Étant donné la variabilité des temps d'exécution des éléments structuraux CIMEDE, plusieurs mesures ont été effectuées. Les résultats comportent donc, d'une part, des moyennes dites "*réelles*", qui sont des moyennes arithmétiques sur tous les résultats enregistrés et, d'autre part, des moyennes dites "*normales*", qui sont des moyennes arithmétiques effectuées en retirant les résultats s'écartant fort des autres²⁷. Les résultats relatifs au montage sur chantier se présenteront donc sous forme d'intervalles.

26. Cf. courbe d'apprentissage au point 2.2.1, à la page 8.

27. Résultats correspondant à des processus sujets à des problèmes et à des pertes de temps indésirables.

6.6.2 Transport

Le transport sur chantier des éléments structuraux se réalisent par semi-remorques et est assuré par l'entreprise Havart. Certaines hypothèses sont à prendre en compte dans cette partie de la modélisation notamment en ce qui concerne le nombre de camions, la distance entre le chantier et le hall de production, etc. étant donné que le trajet réalisé par la structure des bureaux de l'Atelier de l'Avenir n'est pas représentatif de la réalité. Ces hypothèses sont reprises dans le tableau 6.9, à la page 107 et ont été discutées avec l'Atelier de l'Avenir.

Poste	Quantité	Unité
Tracteurs	1	[-]
Remorques	3	[-]
Distance entre chantier et hall de production	50	[km]
Vitesse moyenne charroi	60	[km/h]
Durée trajet	50	[min]

TABLE 6.9 – Hypothèses de modélisation du transport sur chantier

Le transport a été imaginé comme suit :

- Les trois remorques sont dans le hall de l'Atelier de l'Avenir,
- Dès que la remorque 1 est chargée, le tracteur part avec cette dernière vers le chantier et la remorque 2 peut commencer à être chargée,
- Arrivé sur chantier, le tracteur laisse la remorque 1 sur place et revient vers l'Atelier de l'Avenir. La grue peut alors commencer à décharger la remorque 1 pour monter la structure,
- Le tracteur prend la remorque 2 chargée et l'amène sur chantier. La remorque 3 peut commencer à être chargée,
- Arrivé sur chantier, le tracteur laisse la remorque 2. Il revient aussitôt vers l'Atelier de l'Avenir avec la remorque 1 laissée initialement sur le chantier et vidée par la grue,
- A son retour à l'Atelier de l'Avenir, le tracteur place la remorque 1 qu'il vient de ramener dans le hall et repart avec la remorque 3 chargée et ainsi de suite.

La VSM relative au transport est reprise sur la figure 6.32, à la page 108. Les détails des mesures sont reprises dans l'annexe B, à la page 149.

On peut remarquer que le C/T du transport est plus important que le L/T, ce qui ne vérifie pas l'inégalité 2.5, à la page 33. En effet, pour un processus de transport, nécessitant l'attente du retour du seul transporteur avant que le prochain lot de produits ne puisse être acheminé, le L/T des produits passé dans le trajet vaut la moitié du C/T du processus correspondant à la fréquence à laquelle le transporteur peut fournir le processus aval. Dans notre cas, le transport de la structure sur chantier dure 60 minutes.

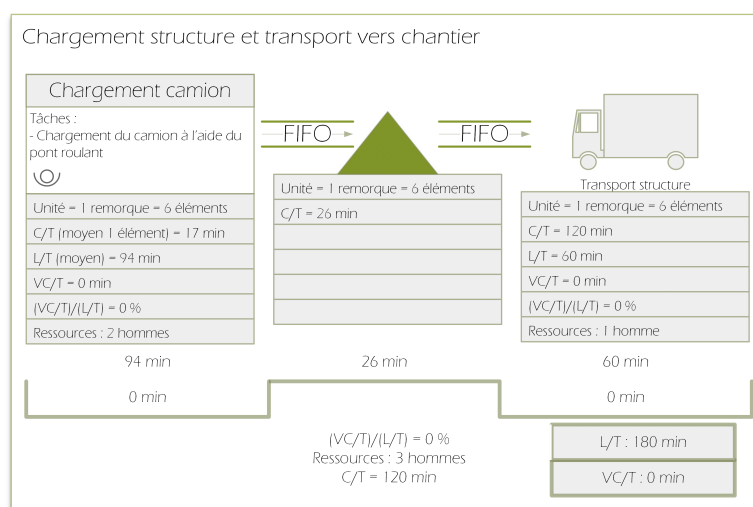


FIGURE 6.32 – VSM du transport sur site de la structure CIMEDE

La structure reste donc 60 minutes dans le camion durant le transport. Or, le camion avant de pouvoir fournir à nouveau le processus de montage prendra deux fois le temps du trajet, soit 120 minutes.

6.6.3 Montage des murs

Le montage sur chantier est assuré par des monteurs agréés provenant de l'entreprise Abraham. Le processus relatif au montage des murs sur chantier, aussi bien au RDC qu'au Niv+1, est repris sur la figure 6.33, à la page 109. Étant donné la non standardisation des murs suite à la personnalisation du client et la conception de la maison suivant un ordre de montage bien particulier, des liens FIFO sont présents ici.

Par ailleurs, les données relatives aux processus de montage sont sous forme d'intervalles, comme annoncé supra. Les valeurs de toutes les mesures réalisées sur chantier sont reprises graphiquement sur l'annexe C, à la page 163. Nous pouvons voir sur ce graphique la variabilité des temps de mise en œuvre. Les valeurs s'écartant énormément des moyennes normales dépeignent des processus pour lesquels un problème est survenu durant le montage. Une analyse de ces problèmes basée sur la méthode des 5-Why²⁸ sera menée ultérieurement de manière à tenter de percevoir la raison principale du problème.

La proportion du temps nécessaire au montage d'un niveau de murs ajoutant de la valeur reste relativement faible. La présence de stocks et des tâches n'ajoutant pas de valeur au produit expliquant ce faible rapport $(VC/T)/(L/T)$ du processus, est reprise

28. Notion de théorie du point 2.3.2, à la page 26.

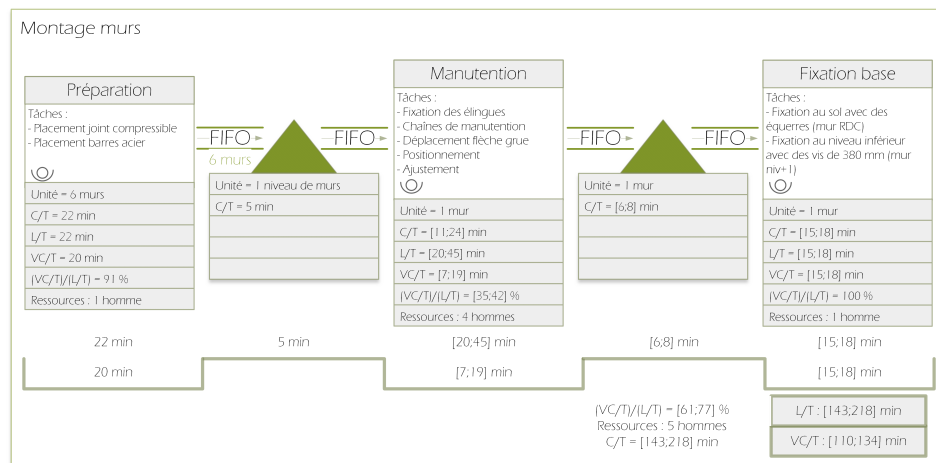


FIGURE 6.33 – VSM du montage sur site des murs CIMEDE

dans les détails du processus de montage de 6 murs dans l'annexe B, à la page 149.

6.6.4 Montage des planchers

La VSM du montage des planchers et des éléments de toiture est représentée sur la figure 6.34, à la page 110. On peut y apercevoir qu'en réalité, seul le premier processus fonctionne sur une unité de production correspondant à un plancher. La conception des processus suivants nécessite que l'unité de production soit un lot de 6 planchers. Les 5 derniers processus du montage des planchers ne se déroulent donc pas simultanément sur des produits différents mais s'enchaînent bien sur un seul produit correspondant au lot de 6 planchers. Les ressources humaines nécessaires au montage des planchers d'une maison se limitent donc bien à 4 personnes.

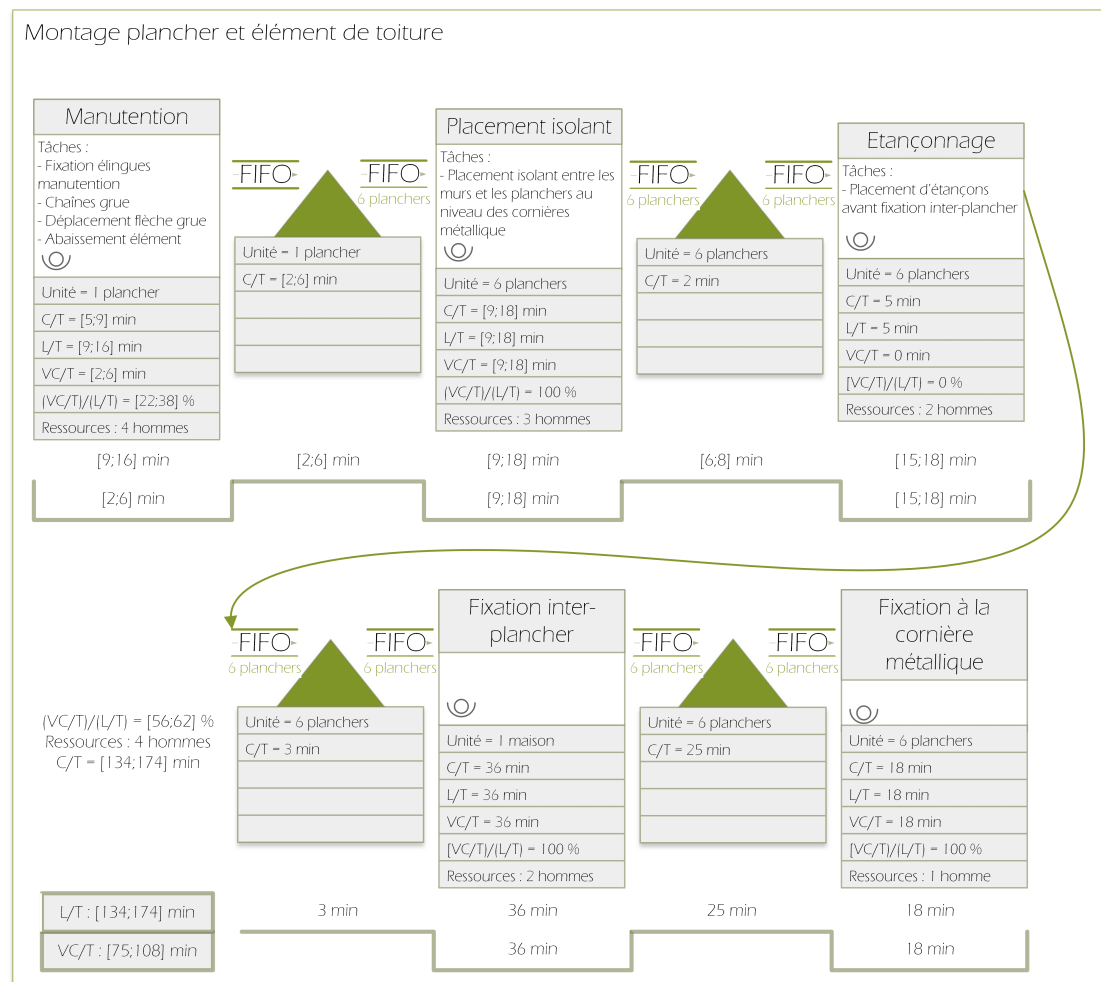


FIGURE 6.34 – VSM du montage sur site des planchers CIMEDE

Comme pour le montage des murs, les mesures des temps de montage sont sujettes à une variabilité. Cette dernière est visible dans l'annexe C, à la page 163. Les valeurs extrêmes traduisent, comme pour les murs, que les processus ont connu des problèmes lors de la mise en place de certains éléments. La raison de certains de ces problèmes seront analysés ultérieurement suivant la méthode des *Five-Why*.

6.6.5 Montage des acrotères

La VSM du montage des 4 acrotères est reproduite sur la figure 6.35, à la page 111. Mis à part le fait que les temps de mise en œuvre sont légèrement différents de ceux des murs, il n'y a pas de remarques particulières à ajouter par rapport à celles énoncées dans la modélisation des murs. La seule remarque que nous puissions faire est que les durées

de stockage sont ici nulles entre les processus. Les stocks sont tout de même représentés de manière à mettre en évidence le fait qu'un stockage à cet endroit est physiquement possible et qu'on ne l'a pas oublié.

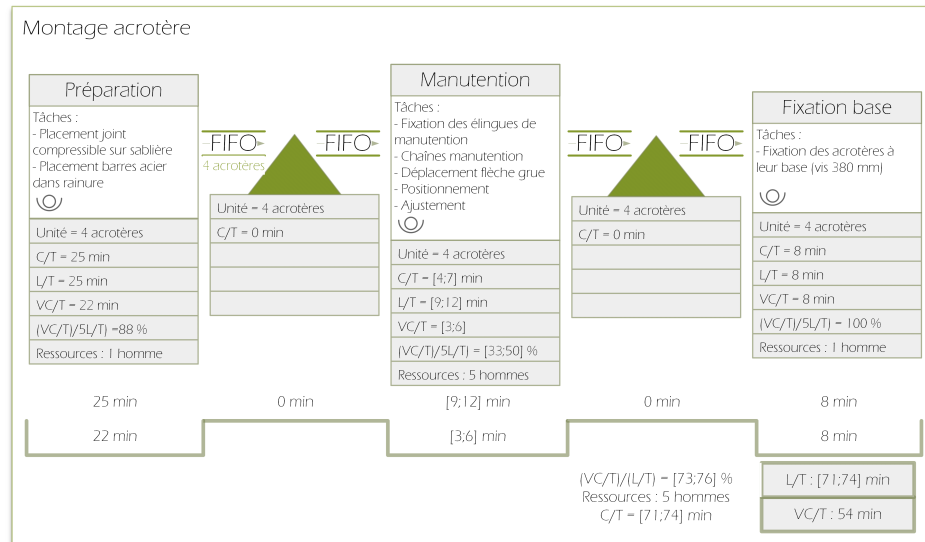


FIGURE 6.35 – VSM du montage sur site des acrotères CIMEDE

Le détail du montage des acrotères est également présent dans l'annexe B, à la page 149.

6.6.6 Première étanchéité

A la fin du montage de la structure, un processus relatif à l'application d'une première étanchéité sur le bâtiment a lieu. Ce processus est illustré sur la figure 6.36, à la page 112. Cette étanchéité est réalisée également par les monteurs de l'entreprise Abraham.

Comme pour la préparation du terrain, il n'a pas été possible de déterminer le VC/T de l'application de la première étanchéité. Dans le doute, ce dernier est égalé au L/T du processus.

6.6.7 Bilan du montage

Le séquençement du montage des bureaux de l'Atelier de l'Avenir est illustré sur la figure 6.37, à la page 112.

L'exécution sur chantier de la structure CIMEDE pour une maison type comporte 6



FIGURE 6.36 – Processus relatif à la première étanchéité du bâtiment à la fin du montage de ce dernier

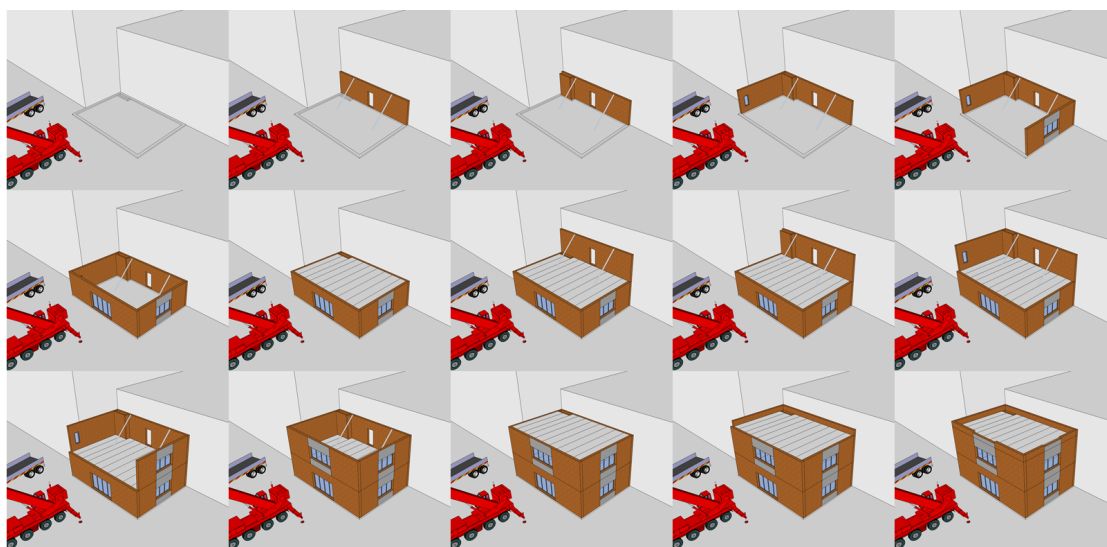


FIGURE 6.37 – Montage des bureaux de l'Atelier de l'Avenir

étapes principales :

1. Mise en place des murs du RDC,
2. Mise en place des planchers,
3. Mise en place des murs du Niv+1,
4. Mise en place des éléments de toiture,
5. Mise en place des acrotères,
6. Application d'une première étanchéité.

La VSM du montage reprenant ces 6 processus est représentée sur la figure 6.38, à la

page 113.

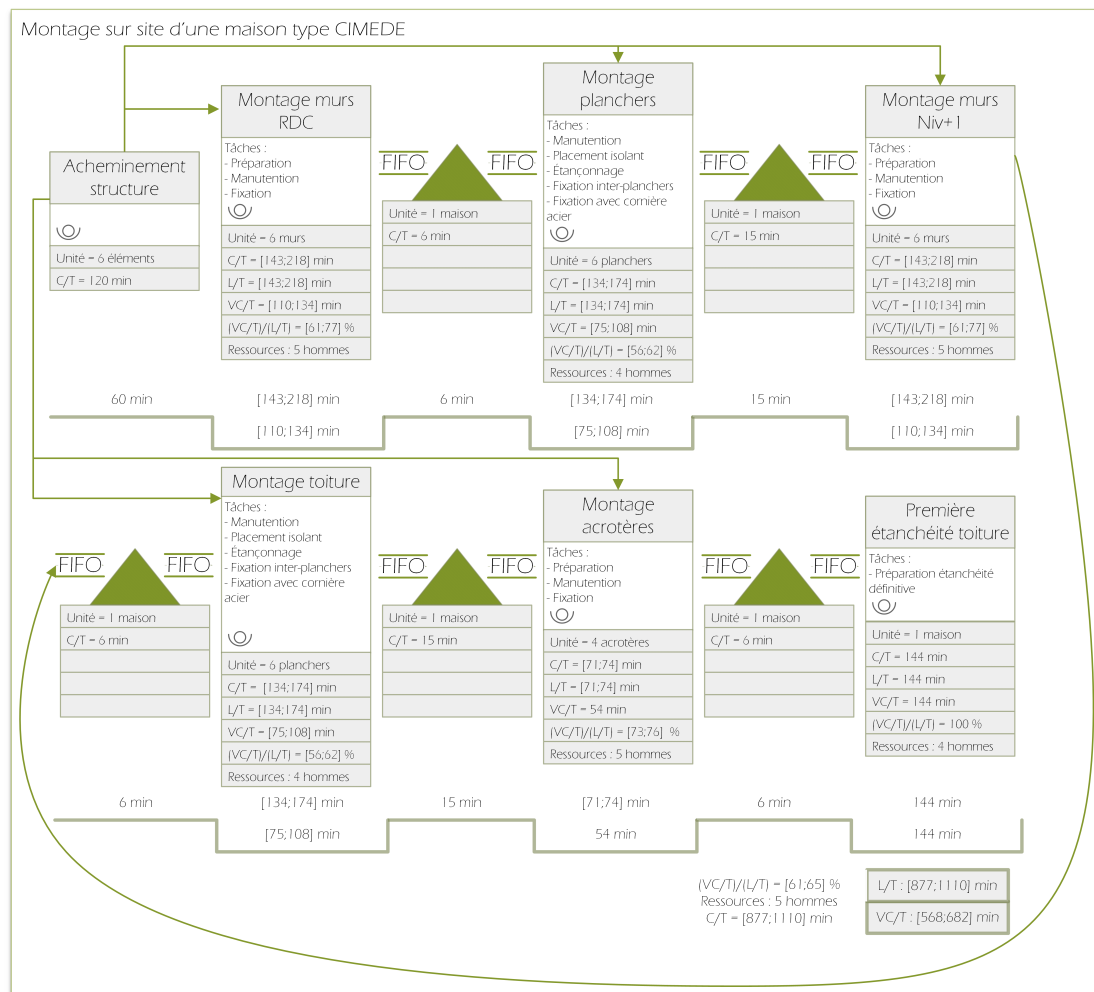


FIGURE 6.38 – VSM du montage de la structure d'une maison type CIMEDE

On peut remarquer tout d'abord que des liaisons FIFO, en lien avec l'aspect non standard de la maison en cours de construction, sont utilisées.

D'autre part, on peut remarquer que le processus correspondant au transport alimente tous les processus principaux. En effet, le montage doit dans un premier temps attendre que le premier chargement arrive sur chantier. Ensuite, pendant que les murs du RDC sont en phase de montage, le camion peut aller chercher le second chargement pour l'acheminer sur le chantier. De cette manière, le transport peut approvisionner le processus de montage toutes les 120 minutes. Comme le C/T des processus de montage valent entre 138 et 218 minutes, le camion devra un peu attendre avant de pouvoir repartir avec une remorque vide. Cependant, financièrement, il est plus économique de faire

attendre le camion que la grue de manutention sur site²⁹.

La mise en œuvre de la structure CIMEDE se fait assez rapidement. Le L/T est compris entre 877 et 1110 minutes, ce qui ne représente que 2 grosses journées de travail. Cependant, on peut remarquer que le rapport $(VC/T)/(L/T)$ reste encore faible. Le *flow process chart* du montage, repris dans l'annexe D, à la page 165 met en évidence les processus n'ajoutant pas de valeur. Évincer ces derniers permettrait d'encore diminuer le L/T du montage d'une structure CIMEDE.

Par ailleurs, la réalisation des bureaux de l'Atelier de l'Avenir a duré en réalité 1122 minutes. Nous pouvons donc voir que la modélisation effectuée corrobore plus ou moins avec la réalité. En ce qui concerne la création de valeur, le rapport $(VC/T)/(L/T)$ réellement mesuré sur le chantier des bureaux s'élève ici à 85%. La modélisation ne corrobore donc pas vraiment avec ce qu'il s'est réellement passé sur le chantier des bureaux. La raison est le fait que, durant le montage des bureaux, des ouvriers de l'Atelier de l'Avenir sont intervenus sur la construction, alors qu'il n'est a priori pas prévu que ces hommes ne participent au montage de la structure dans les constructions futures.

Enfin, la comparaison entre le C/T des processus de montage et le TT , qui vaut ici $TT_{\text{maison}}/6$ ³⁰, réalisée sur la figure 6.39, à la page 114, illustre le fait que le montage se réalise beaucoup plus rapidement que nécessaire.

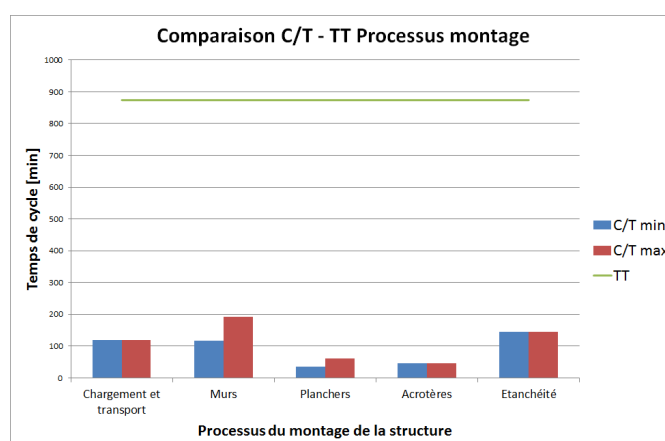


FIGURE 6.39 – Comparaison des C/T des processus relatifs au montage sur site et du TT

29. Information provenant de l'Atelier de l'Avenir.

30. Étant donné qu'on a 6 processus principaux pour le montage de la maison, on considère qu'un sixième de la maison doit être effectué dans un laps de temps égal à $TT_{\text{maison}}/6$

6.7 Finitions

De manière à pouvoir modéliser le macro-processus concernant les finitions de la meilleure manière qu'il soit, il a d'abord été nécessaire de repérer des tâches distinctes dans l'ensemble des finitions et de regrouper certaines tâches entre elles de manière à mieux visualiser la transformation du bâtiment. Cette répartition des tâches a également tenu compte de l'intervention des différents corps de métier, externes à l'Atelier de l'Avenir, qui sont intervenus sur le bâtiment. Ces équipes sont répertoriées dans le tableau 6.10, à la page 115.

Entreprise	Tâches	Nombres d'hommes
Michoel	Revêtement toiture	2 à 4
Kazemir	Ventilation	2 à 3
M. Draga's	Pose du lino	1
AdM	<ul style="list-style-type: none"> - Manutention des éléments structuraux en Atelier et chargement camion - Pose panneaux pour chape sèche - Crépis - Pose bouchons murs, trappes planchers et RF cornières - Pose cloisons et contre-cloisons - Pose des panneaux de finition cloisons et contre-cloisons - Pose des sanitaires (raccord avec gaine technique) - Enduit et peinture plafond 	3 à 4
KSEPPI	Electricité	3
<i>inconnue</i>	Chape humide et carrelage	1

TABLE 6.10 – Constitution des équipes des différents corps de métier

Après cette étape, il a été nécessaire de convertir les temps de finitions des bureaux de l'Atelier de l'Avenir pour une maison de 90 m². Ceci a pu être effectué via le calcul d'un rendement pour chacune des tâches de finition. Ces rendements sont consultables dans l'annexe F, à la page 175³¹. Sur base de ces rendements, le déroulement actuel des finitions a pu être analysé. Ce dernier est illustré sur le diagramme de Gantt repris dans l'annexe E, à la page 173. Une scission par niveau a été réalisée afin d'observer s'il y a eu une trame générale dans la réalisation des travaux. Cette répartition est visible sur la figure 6.40, à la page 116.

31. On peut remarquer sur ce calcul de rendements que les C/T des tâches diffèrent pour chaque niveau. Les résultats des finitions seront donc, comme pour le montage de la structure, compris dans un intervalle.

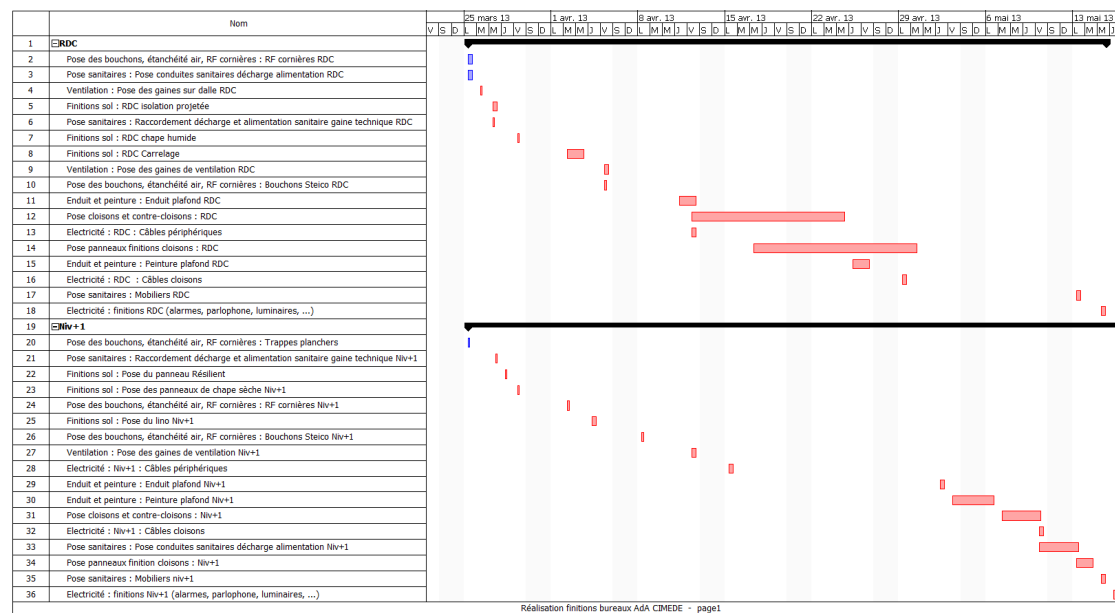


FIGURE 6.40 – Diagramme Gantt représentant le déroulement des finitions intérieures des bâtiments CIMEDE

On peut directement apercevoir que les finitions, malgré une tendance plus ou moins identique pour les deux niveaux, se sont déroulées de manière désorganisée : il n’existait pas un flux de travail au sens de la théorie du *lean* lors de la transformation du bâtiment. Les données de production des processus de finitions sont reprises dans la tableau 6.11, à la page 116.

Unité de production	VC/T [min]	L/T [min]	(VC/T)/(L/T) [%]
Extérieur du bâtiment	6840	12312	56
Etage RDC	8664	15504	56
Etage Niv+1	7296	16416	44
Bâtiment	14136	16416	86

TABLE 6.11 – Données relatives aux finitions du bâtiment type

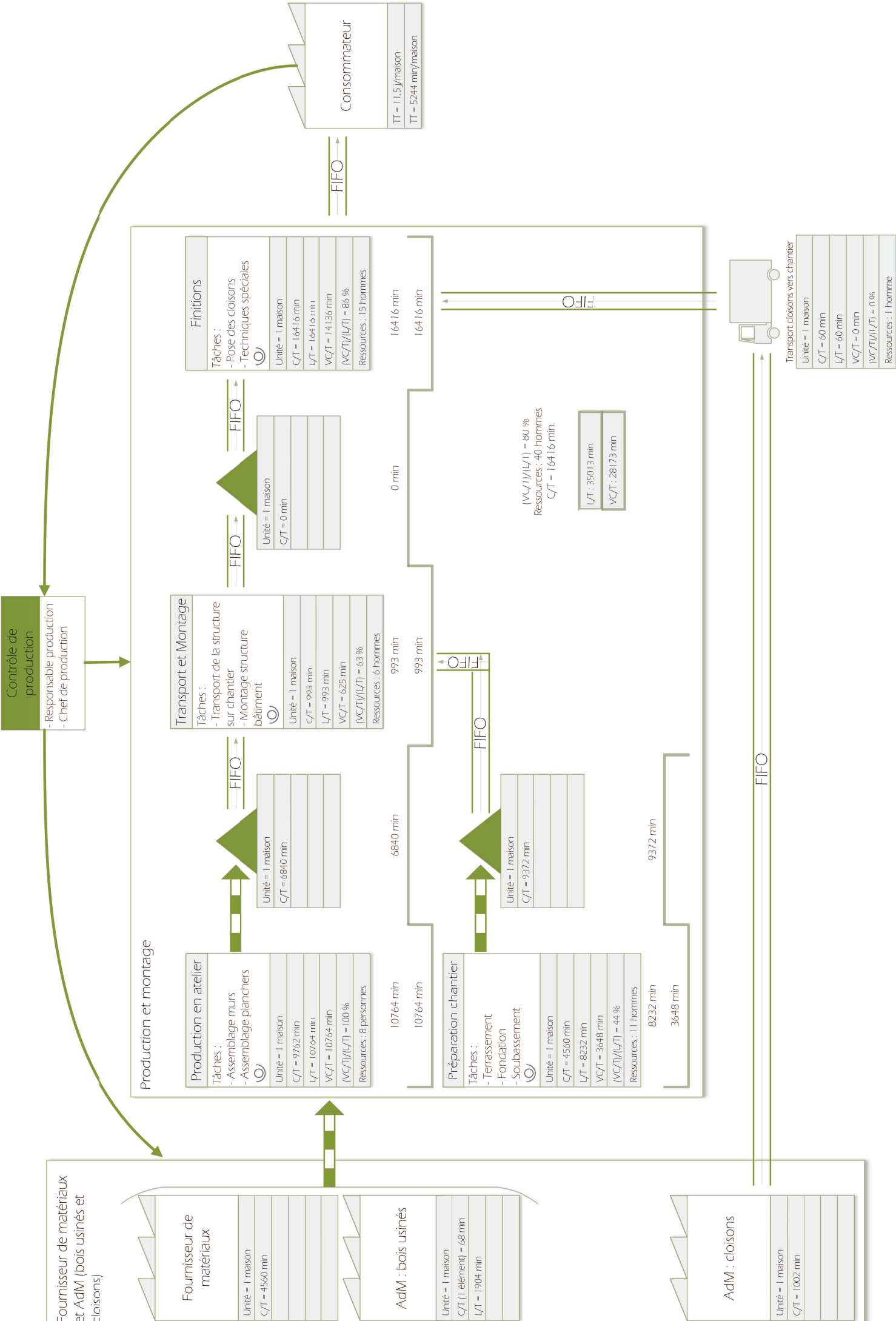
On peut observer dans ce tableau que la proportion de création de valeur du processus global de finitions est assez important dans le cas où l’unité de production est le bâtiment. Cependant, dès que l’on raffine l’unité de production et qu’on passe à un étage, le rapport $(VC/T)/(L/T)$ chute assez fort. Le flux de valeur n’existe donc bel et bien pas dans cette organisation si on tente de diminuer l’unité de production.

6.8 Cartographie globale du système constructif

6.8.1 Analyse globale de la VSM

La VSM globale du système constructif CIMEDE est reprise à la page suivante. On peut y remarquer la mise en évidence des 3 macros-processus mentionnés au début de cette analyse du système constructif CIMEDE.

La préparation du terrain se déroulant en même temps que la production des éléments structuraux, nous retrouvons bien les deux processus en parallèle sur la VSM.



Par ailleurs, comme il avait été annoncé antérieurement, il est important de bien choisir l'unité de production. Ici, étant donné l'aspect global de la VSM, l'unité correspondant à un élément structurel CIMEDE ne permet plus de comparer les macro-processus entre eux, comme nous avons pu le voir dans les parties consacrées à l'étude de la mise en œuvre sur chantier et des finitions. La maison type est donc prise en compte dans cette VSM globale. Le seul inconvénient généré par ce choix est qu'il n'est plus possible d'analyser en détail la non création de valeur au sein de la chaîne. En effet, en ce qui concerne la production par exemple, lorsque le premier mur est produit et attendu dans le stock de fin de chaîne, les autres éléments constitutifs de la maison sont en cours de production. La maison acquiert donc de la valeur tout au long de la production des éléments. Ce qui explique que le VC/T est égal au L/T dans la production. Ensuite, lorsque la maison est totalement produite et est prête à être acheminée sur chantier, elle entre dans un stock qui est illustré sur la VSM globale du système CIMEDE.

Le stock entre la production et l'exécution sur chantier de la structure est ici un peu faussée étant donné les conditions climatiques qui ont sévi avant le montage des bureaux de l'Atelier de l'Avenir occasionnant un retard important du montage. Ce stock reste cependant toujours bien présent dans la VSM étant donné que ces mauvaises conditions climatiques peuvent très bien avoir lieu pour une construction future forçant à retarder le montage.

En ce qui concerne la transmission de l'information, on peut remarquer que cette dernière se déroule de manière traditionnelle, dont les méfaits sont expliqués dans la théorie au point 2.4.4, à la page 36. Le poste de contrôle reçoit bien les desiderata du client, dicte les informations aux différents processus de production, sans se soucier de l'état d'avancement de chacun d'eux, et commande les matériaux nécessaires à la satisfaction de la commande du client. Ce style de communication réside sur l'ensemble de la chaîne, autant en atelier que sur le terrain.

6.8.2 Analyse des résultats numériques

Les données relatives à l'approvisionnement en matière première ont déjà été calculées au point 6.4.1, à la page 93.

Concernant le processus de production en atelier, les données sont calculées sur base des formules ci-dessous :

$$C/T_{\text{processus global}} = n \times C/T_{\text{sous processus}} \quad (6.4)$$

$$L/T_{\text{processus global}} = L/T_{\text{sous processus}} + (n - 1) \times C/T_{\text{sous processus}} \quad (6.5)$$

Nous obtenons :

$$C/T_{\text{production maison}} = 12 \times 591 + 6 \times 445 = 9762 \text{ min} \quad (6.6)$$

$$L/T_{\text{Production maison}} = 1593 + 11 \times 591 + 6 \times 445 = 10764 \text{ min} \quad (6.7)$$

Les temps de préparation du terrain et de mise en œuvre sur chantier ont également déjà été calculés supra, au point 6.5, 6.6 et 6.7, aux pages 103, 105 et 115 respectivement. Pour le processus de montage, une valeur moyenne a été considérée ici de manière à simplifier les résultats.

Ces données permettent de déterminer le L/T totale de construction d'un maison, depuis la commande du client jusqu'à la réception du bâtiment. Ce L/T total vaut :

$$L/T_{\text{maison}} = 4560 + 35013 = 39573 \text{ min} = 87 \text{ jours ouvrables} \approx 4 \text{ mois} \quad (6.8)$$

Le temps de cycle de la fabrication d'une maison est de :

$$C/T_{\text{maison}} = \max(C/T_{\text{macro-processus}}) = 16416 \text{ min} = 36 \text{ jours ouvrables} \quad (6.9)$$

On peut donc voir à présent que le client ne sera pas satisfait étant donné que le temps de cycle du système constructif CIMEDE ne rejoint pas le *takt time* de 11,5 jours ouvrables calculé au point 6.1, à la page 84.

6.9 Analyse Five-Why

Lors de l'étude du système CIMEDE, différents problèmes ont été décelés, menant la plupart du temps à des temps de mise en œuvre qui s'accroissent fortement. C'est pourquoi une étude de la raison de ces problèmes va être menée ici sur base d'une analyse *Five-Why*. La schématisation employée ici diffère légèrement de celle présentée dans la théorie sur la figure 2.15, à la page 26. Elle se basera sur le diagramme générique présenté à la figure 6.41, à la page 121 illustrant, non une seule, mais plusieurs causes possibles des problèmes sous-jacents.

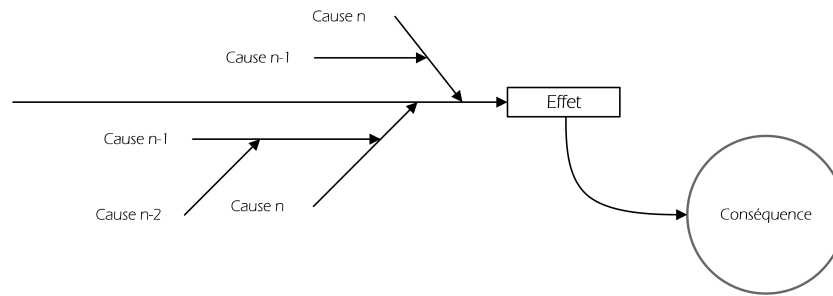


FIGURE 6.41 – Exemple d'un diagramme causes - conséquences

6.9.1 Problème lors de l'exécution du gros œuvre

Lors de l'exécution du montage de la structure des bureaux de l'Atelier de l'Avenir, il a été observé que le placement des derniers éléments posait généralement toujours problème, comme en témoigne les temps de mise en œuvre repris dans l'annexe C, à la page 163³². Il a été décidé ici de déceler les raisons principales du problème survenu lors du positionnement du pignon 3³³ visible sur la figure 6.42, à la page 121.

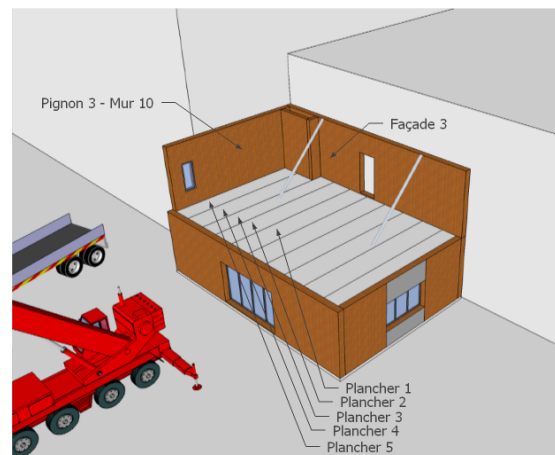


FIGURE 6.42 – Visualisation du mur problématique

Ce positionnement et l'ajustement de ce mur ont pris 67 minutes alors que la moyenne normale de ces deux tâches est de 7 minutes.

Une des premières raisons décelées est que la conception de l'ordre de montage avait pour conséquence que, lors du placement du mur, il y avait 6 attaches KNAPP à fixer³⁴.

32. Positionnement et ajustement des murs

33. Correspondant au mur 10 sur le diagramme de l'annexe.

34. 3 sur la façade 3 et 3 sur le mur de la gaine technique attenant au pignon 3

Une autre raison a été le fait que le panneau de VIDIWALL de la face intérieure du pignon 3 a été légèrement décalé en atelier, ce qui réduisait l'espace pour introduire le mur de la gaine technique attenant au pignon 3. En effet, à cette jonction, le panneau s'interrompt sur une longueur correspondant à l'épaisseur du mur de la gaine technique de manière à ce que le montant de ce mur puisse être fixé avec les attaches KNAPP sur le panneau d'OSB du pignon 3, comme l'illustre la photo de la figure 6.43, à la page 122.



FIGURE 6.43 – Discontinuité dans le panneau de VIDIWALL du pignon 3

La raison la plus importante est le fait qu'on s'est rendu compte sur chantier que l'axe du pignon 1³⁵ n'était pas en face de l'axe des attaches KNAPP de la façade 3. Une des raisons expliquant cet écart est que, lors de la mise en place du plancher 5, il a fallu un peu forcer sur la structure étant donné que l'espace prévu pour ce plancher était insuffisant. La cause de ce décalage a été que tous les éléments de planchers avant, de 1 à 4, étaient également décalés³⁶. On s'est ensuite aperçu que ce décalage successif des planchers était dû au déplacement du COMPRIBAND³⁷ placé sur le côté de la solive extérieure, en partie inférieure. Ce COMPRIBAND est illustré sur la figure 6.44, à la page 123. Sa disposition sur les éléments de plancher est illustrée sur la figure 6.45, à la page 123.

Une étude antérieure portant sur les tolérances du système constructif CIMEDE a démontré la nécessité de l'utilisation de ce COMPRIBAND de manière à assurer une isolation acoustique fiable suite aux défauts de rectitude des éléments de plancher et de toiture [Bar11].

Il avait été imaginé réaliser une rainure dans les solives afin d'y placer ce COMPRIBAND et d'éviter que ce dernier ne dépasse trop de l'extrémité du plancher, mais il s'est avéré

35. Sous le pignon 3

36. Pour empêcher de reporter une telle erreur sur une trop grande distance, les planchers sont posés à partir de la moitié de la portée de la façade et sont déposés successivement vers les pignons.

37. Joint en mousse de polyuréthane recouvert initialement par une membrane et qui s'expande dès que l'on retire cette membrane.



FIGURE 6.44 – COMPRI-BAND pour assurer l'isolation acoustique [Bar11]

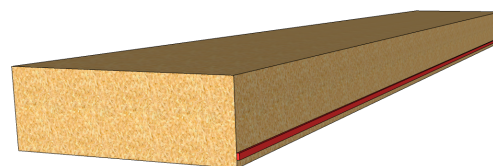


FIGURE 6.45 – Disposition des COMPRI-BAND sur les éléments de plancher et de toiture

que cet usinage n'a pu avoir lieu étant donné les dimensions de la section des solives.

La schématisation de ces liens causes - conséquences est illustrée sur la figure 6.46, à la page 123. Les conséquences de ce problème ont été un rainurage de la plaque de Vidiwall du pignon in situ, générant un arrêt du chantier pendant près de 50 minutes, ainsi qu'un forçage sur la structure de manière à placer le pignon de la meilleure manière qu'il soit. Ces conséquences sont illustrées sur les figures 6.47 et 6.48, à la page 124.

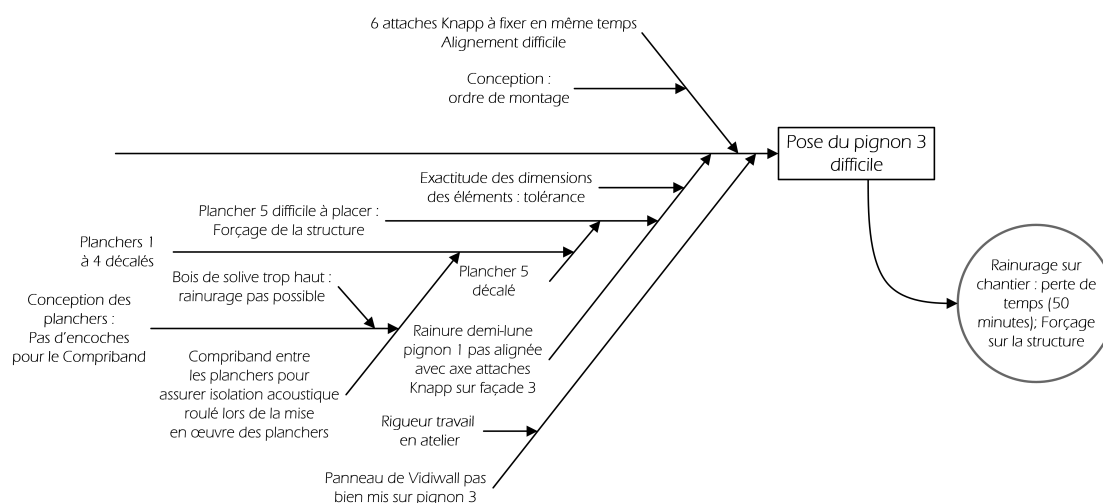


FIGURE 6.46 – Réseau causes - conséquences d'un problème d'exécution

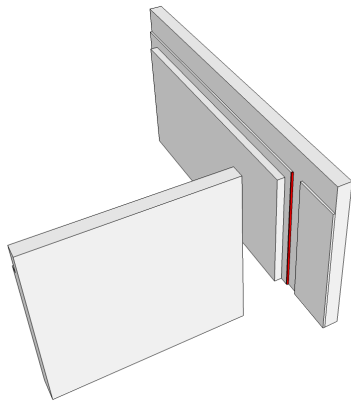


FIGURE 6.47 – Rainure dans le VIDIWALL
FIGURE 6.48 – Forçage sur la structure im-
du pignon 3 sur chantier - perte de temps prévu - perte de temps

6.9.2 Problème durant les finitions

Un autre problème durant l'exécution sur chantier, plutôt général cette fois, est le temps de cycle des finitions. En effet, comme nous l'avons vu au point 6.7, à la page 115, les finitions des bureaux se sont déroulées de manière désorganisée générant d'importants temps de mise en œuvre.

Une des raisons directes de cet important temps de cycle des finitions est la mise en œuvre des cloisons qui ont pris énormément de temps. Une cause de cet important C/T de la pose des cloisons est qu'il y a eu une erreur dans la commande des cloisons et donc un défaut de fabrication inacceptable pour le système CIMEDE forçant l'usinage et l'assemblage d'un nouveau lot de cloisons.

L'important C/T de la pose des cloisons est dû également à la pose des panneaux de finitions, comme il est décrit dans la description du système constructif CIMEDE au point 4.2.3, à la page 72. Les raisons de la difficulté de la pose de ces cloisons sont de deux natures : premièrement, la pose des lattes de fixation biseautées en MDF fixées sur les cloisons sont difficiles à placer précisément, et, deuxièmement, les panneaux de finitions ne sont pas standards et la découpe de ces panneaux sur chantier nécessite beaucoup de temps.

L'important C/T des cloisons est également dû au manque de repères pour le placement des sabots supports des cloisons au sol ainsi que toutes les fixations des cloisons avant l'application des panneaux de finition sur les cloisons qui ne sont pas standards également. Ces deux problèmes sont illustrés sur les figures 6.49 et 6.50, à la page 125.

D'autre part, le C/T des finitions est dû au manque de synchronisation des corps de métier, lui-même dû au fait que les C/T des processus de finitions ne sont pas identiques



FIGURE 6.49 – Sabots de support des cloisons collés au sol - repères difficiles



FIGURE 6.50 – Fixations des cloisons complexes et non standards - perte de temps

et que les corps de métiers sont externes à l'Atelier de l'Avenir et ont donc d'autres chantiers, ne concernant pas CIMEDE, en cours.

Une dernière raison du C/T important des finitions est le fait que, au premier étage des bureaux, un plafonnage intégral du plafond a dû être effectué étant donné le manque de planéité de ce dernier empêchant la fixation des luminaires. Ce défaut est dû en réalité au manque de rectitude des éléments de toiture lui-même due à l'utilisation de bois KVH qui ne sont pas assez réguliers sur de si grandes portées pour le système CIMEDE³⁸.

La conséquence de ce problème est que le TT n'est pas respecté et que le client est alors insatisfait.

Ces liens causes-conséquences concernant les finitions du bâtiment sont illustrés sur le graphique de la figure 6.51, à la page 126.

6.10 Optimisation du système constructif

L'optimisation du système constructif peut se réaliser de différentes manières. Dans le cadre de ce travail, une proposition concernant les finitions, macro-processus méritant le plus d'une intervention étant donné son important C/T, a été imaginée.

38. Ce problème a déjà été résolu en partie via l'utilisation de BLC nettement plus réguliers pour les solives des éléments CIMEDE horizontaux. Les planchers des bureaux ont été produits après les éléments de toiture réalisés avec des bois KVH tordus. D'ailleurs, la production de ces éléments ne s'est pas déroulée facilement.

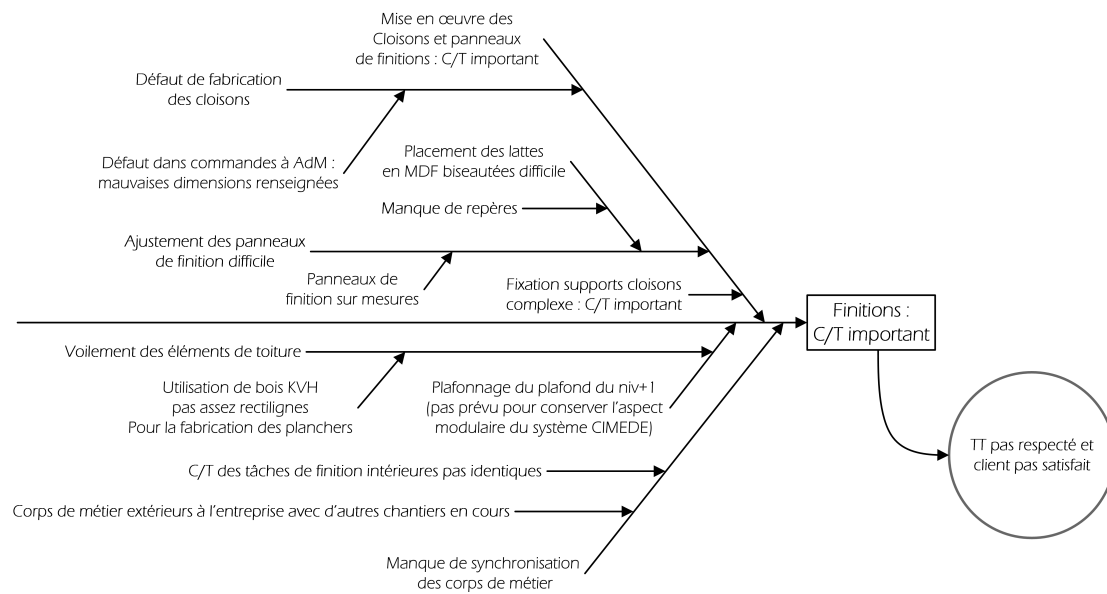


FIGURE 6.51 – Réseau causes - conséquences d'un problème de finitions

6.10.1 Finitions extérieures

L'organisation des finitions extérieures n'a pas subi de modifications, si ce n'est qu'elles ont été dissociées des finitions intérieures. La VSM des finitions extérieures est reprise sur la figure 6.52, à la page 127.

Tout comme pour la majorité des VSM du système CIMEDE, la non-standardisation des produits mène à l'utilisation de liens FIFO ici également.

En ce qui concerne les VC/T des processus de finition, des hypothèses ont dû être prises ici aussi. En effet, le VC/T du revêtement de la toiture n'a pu être mesuré. Dans le doute, il a été égalé au L/T. Par ailleurs, le revêtement des bureaux de l'Atelier de l'Avenir étant majoritairement réalisé en panneaux de FUNDERMAX, la tâche correspondant au crépissage n'a pas pu être mesurée. Un rendement de crépissage a donc dû être approximé en concertation avec l'entreprise KNAUF. Le VC/T a également été égalé au L/T du processus.

6.10.2 Finitions intérieures

L'organisation proposée des finitions intérieures est consultable dans l'annexe G, à la page 177. Dans cette optique, tous les processus se suivent de manière organisée et séquencée de manière à respecter le TT. L'unité de production peut être assimilée sans

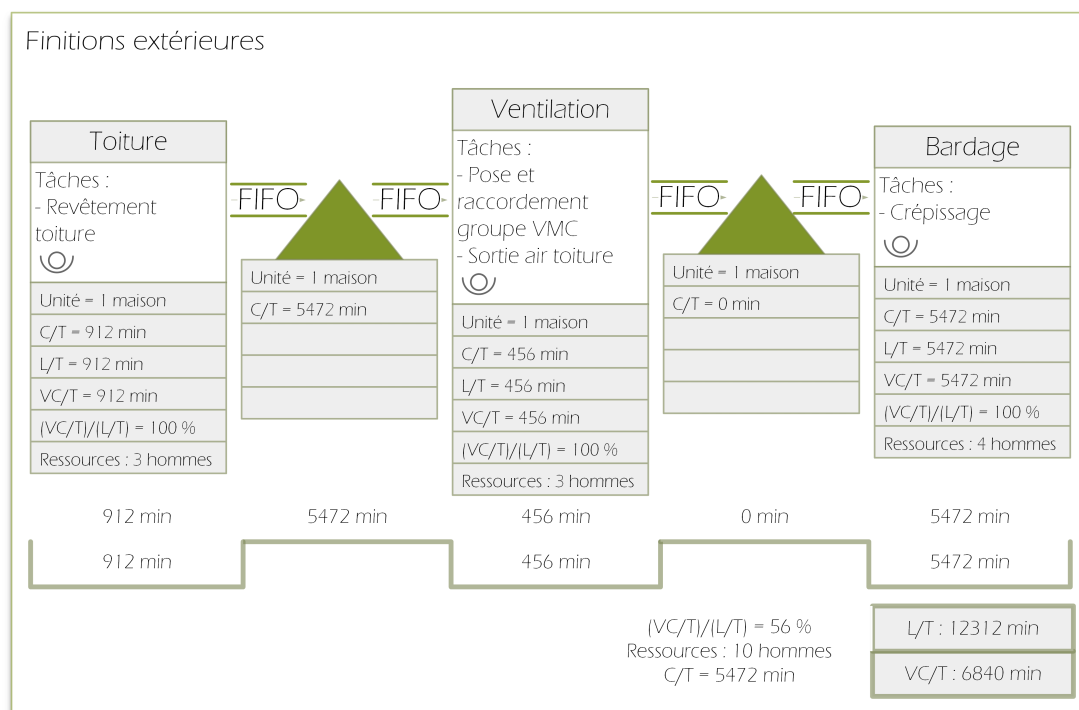


FIGURE 6.52 – VSM des finitions extérieures du bâtiment CIMEDE

problème à un étage³⁹ pour l'analyse, contrairement au déroulement des finitions pour les bureaux de l'Atelier de l'Avenir. On peut seulement constater que le nombre d'hommes nécessaire pour assurer ce flux de travail est nettement plus grand.

6.11 Utilisation des ressources

L'utilisation des ressources humaines et matérielles intervenant dans le système CIMEDE n'a ici pas été étudiée de manière exhaustive étant donné la quantité de résultats déjà obtenus. Cependant, l'activité de certaines ressources a été enregistrée durant le montage des bureaux de l'Atelier de l'Avenir et est illustrée sur la figure 6.53, à la page 128.

On peut directement se rendre compte que les ressources ne sont pas utilisées de manière optimale. Les proportions du temps durant lequel les ressources interviennent sur la structure sont repris dans le tableau 6.12, à la page 128. Remarquons que, comme il l'a déjà été mentionné supra dans le bilan du montage sur chantier au point 6.6.7, à la

39. Comme le préconise l'*Open-Building*, système organisationnel visant à diviser un bâtiment en construction en zones sur lesquelles les corps de métier peuvent travailler de manière séquentielle [Kos92].

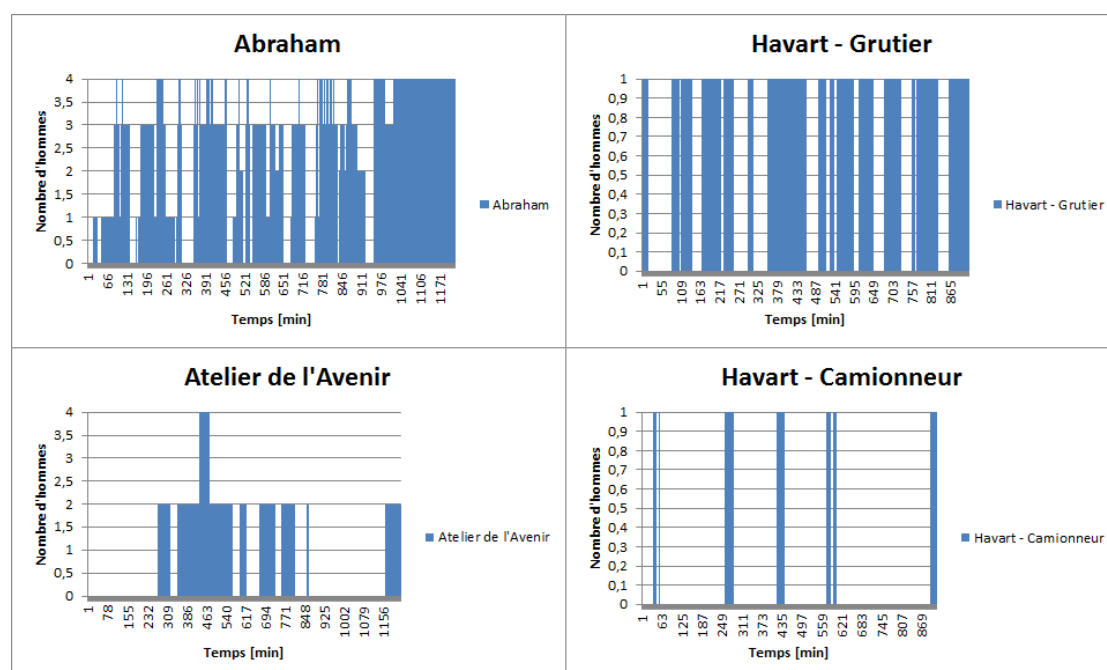


FIGURE 6.53 – Utilisation des ressources humaines durant le montage des bureaux de l'Atelier de l'Avenir

page 111, les ouvriers de l'Atelier de l'Avenir ne sont pas censés participer au montage des structure CIMEDE.

En ce qui concerne l'utilisation des autres ressources, nous pouvons voir que les pourcentages sont assez bas. Concernant celui du camionneur assurant l'acheminement de la structure sur chantier, celui-ci s'explique par le fait que le chantier étant juste à coté du hall de production, le trajet ne s'est résumé qu'à quelques dizaines de mètres.

Ressources	VC/T [homme.min]	L/T [homme.min]	(VC/T)/(L/T) [%]
Abraham	2698	4488	60
Havart - Grutier	528	849	62
Atelier de l'Avenir	984	5610	18
Havart - Camionneur	93	849	11

TABLE 6.12 – Pourcentage de l'utilisation des ressources durant le montage de la structure des bureaux de l'Atelier de l'Avenir

Chapitre 7

Discussion

7.1 Résultats

7.1.1 Contexte

La production de l'Atelier de l'Avenir a débuté il n'y a qu'un an et une seule construction a depuis lors été édifiée. Le système est donc encore pleinement dans une phase de mise en régime. On peut d'ailleurs le remarquer avec le montage sur site de la structure et les finitions pour lesquels les C/T des processus ne sont pas constants. Les résultats obtenus ne représentent donc pas la réalité à 100%.

Par ailleurs, les bureaux de l'Atelier de l'Avenir représentent plutôt un prototype d'étude plutôt qu'un bien de consommation. En effet, cette construction avait plutôt un but expérimental grandeur nature de manière à pouvoir visualiser les défauts du système, avant d'être un lieu de travail.

A propos des résultats enregistrés en atelier, leur validité semble quelque peu anecdotique. En effet, malgré un avertissement préalable au sujet de l'objet de ces mesures, les ouvriers, se sentant évalués, travaillaient de manière plus rentable que d'ordinaire, ce qui a sans doute légèrement faussé les résultats relatifs à la production et à l'approvisionnement des cloisons et des bois usinés.

7.1.2 Explication des résultats

En ce qui concerne les résultats d'exécution sur site, ceux-ci sont compris dans un intervalle de valeur. Pour le montage, la borne inférieure correspond à un montage pour

lequel aucun problème ne surviendrait tout en conservant la conception actuelle. La borne supérieure correspond à ce qui s'est réellement déroulé lors du montage des bureaux de l'Atelier de l'Avenir. Il semble donc raisonnable d'espérer que les temps de montage des constructions futures tiendront dans cet intervalle et qu'ils tendront progressivement vers la borne inférieure.

Une autre explication à la variabilité des résultats peut être la diversité des éléments produits. Concernant la production, bien que cette diversité semble peu présente étant donné qu'il n'y a que deux produits différents¹, chacun de ces produits est réalisé plus ou moins sur mesure selon les desiderata du client, ce qui fait varier les C/T des processus. Pour la production, ces variations de C/T n'étaient pas significatives. Par contre pour la mise en œuvre sur chantier, des variations de C/T ont bel et bien eu lieu.

Ces résultats variables prouvent la dynamique du système et le manque de synchronisation de ce dernier. Le but du *lean* est de vaincre cette dynamique et tendre vers un système statique au sens où les C/T des processus sont constants et ne varient qu'en fonction de la demande du client et non suite à des problèmes techniques, organisationnels ou de communication.

Par ailleurs, les problèmes connus sur chantier d'un système préfabriqué mènent à des ajustements in situ souvent au détriment de la performance du système [Bar11]. En effet, les analyses *Five-Why* ont prouvé cet effet, e.g., le plafonnage intégral du plafond du Niv+1 des bureaux, dû à l'irrégularité des éléments de toiture, annihilant l'aspect modulaire du système ou encore le forçage du plancher 5 menant à une perte de temps sur le placement du pignon 3 et retardant le chantier alors que le système constructif se voulait rapide.

De plus, l'analyse des finitions a prouvé que le système perd le bénéfice de la rapidité de montage sur chantier engendrée par une préfabrication maximisée.

7.1.3 Intérêt de l'application du lean

Les résultats obtenus démontrent l'intérêt d'appliquer les principes du *lean* au sein du système CIMEDE de manière à améliorer sa productivité en éradiquant les sources de non création de valeur. Il est important de noter à cet égard que toutes optimisations effectuées pour améliorer la productivité d'un système sur base d'une cartographie des flux de valeur courante d'un système ne représentent qu'un minimum de toutes les améliorations potentielles à apporter au système productif. En effet, l'aspect itératif de la méthode *lean* permet de retrouver des sources de gaspillage à chaque mise à jour de la conception de la chaîne. L'application du *lean* est une chasse perpétuelle au gaspillage en raffinant continuellement le système. On voit bien le sens que prend le *kaizen* visant

1. Les murs et les planchers.

l'amélioration continue d'un système productif.

Certes, une étude *lean* prend énormément de temps, comme le prouve ce travail, mais il semble que les résultats générés par une telle étude soient extrêmement bénéfiques pour l'amélioration de la productivité de l'entreprise.

D'autre part, le *lean* semble être une condition suffisante mais pas nécessaire d'amélioration de l'efficacité de la construction. En effet, il existe d'autres moyens d'améliorer l'efficacité d'un chantier ou d'une production comme repenser complètement la conception du système. Cependant, le *lean* semble être le moyen le plus économique d'optimisation du système.

7.2 Méthode d'analyse

7.2.1 Cartographie des flux de valeur

La méthodologie employée dans ce travail a permis de mettre en évidence les sources de non-crédation de valeur du système dans un premier temps via la réalisation de la cartographie des flux de valeur courante du système CIMEDE. Cette dernière a été réalisée avec différents niveaux de complexité : un niveau global mettant en évidence les macro-processus du système CIMEDE, ainsi qu'un niveau plus raffiné correspondant au détail de chacun de ces macro-processus. Il a été rapidement observé qu'il n'était pas possible de considérer la même unité de production pour chacun de ces niveaux étant donné la diversité du séquençement des tâches de chacun des macro-processus : en effet, au niveau de la production, prendre comme unité de production un élément structurel était possible alors qu'au niveau du transport, du montage sur site ainsi que des finitions, cette unité de production n'était plus du tout représentative, comme l'ont prouvé les résultats au point 6, à la page 84.

Cependant, un intérêt a été trouvé pour chacune de ces représentations. Effectivement, la représentation globale, quoi que ne permettant pas de déterminer clairement la non-crédation de valeur², a permis de comparer le temps de cycle de production d'une maison avec le *takt time*. D'autre part, les représentations fouillées de la cartographie des flux de valeur, permettant de raffiner l'unité de production, ont justement permis de mettre en évidence cette non création de valeur.

L'enseignement qui peut être tiré de cette observation est que, plus l'unité de production est petite, plus la non création de valeur apparaît, et plus l'unité de production grandit, lorsqu'on tend à représenter un système de manière générale, plus le temps de

2. Comme il est expliqué dans l'analyse globale de la VSM du système CIMEDE au point 6.8.1, à la page 117.

non-création de valeur tend vers zéro. Cette vision globale permet donc plutôt de comparer les C/T avec le TT.

7.2.2 Analyse Five-Why

Après avoir décelé les sources de non-création de valeur, il est important de réaliser une analyse des raisons des problèmes occasionnant cette non-création de valeur. C'est là que prend son sens une analyse causes - conséquences dont l'intérêt est de remonter jusque la conception du système de manière à pouvoir y intervenir pour résoudre les problèmes en aval.

Il est notamment intéressant de remarquer que, comme la littérature le mentionne, les problèmes apparaissent en aval du système et prennent de l'ampleur au fur et mesure qu'ils évoluent avec les produits semi-finis dans la chaîne de production. Le système CIMEDE n'échappe pas à cette réalité comme le prouve l'exemple du problème du placement du pignon 3 généré par un défaut de conception des planchers³ dans un premier temps, et des défauts de précision durant la production sur les découpes et les fixations des panneaux de VIDIWALL dans un second temps.

Par ailleurs, il est primordial de ne pas foncer tête baiss  e et de rester vigilant au fait que la modification de la conception peut générer un autre problème en aval du système, e.g., dans le système CIMEDE, l'utilisation de BLC pour les solives des planchers et des éléments de toiture règlent le problème de l'irrégularité des plafonds du bâtiment mais engendrent alors une hausse du co  t⁴.

De plus, il faut garder à l'esprit que, dans une approche *lean*, un choix n'est pas toujours guidé par une performance à atteindre, mais peut être guidé par un état à atteindre pour faciliter la modélisation et ainsi optimiser les outils de conception.

7.2.3 Analyse financière

L'impact financier de ces gaspillages n'est pas étudié dans ce travail mais mérite cependant une attention particulière étant donné le lien direct entre le temps et l'argent, comme le mentionne la maxime de l'introduction au point 1.1, à la page 2. Le lien direct peut se faire entre le gain de temps et les bénéfices budgétaires engendrés par l'accroissement de la productivité de l'entreprise.    cet égard, il serait intéressant de se préoccuper de l'utilisation des ressources, tant humaines que matérielles, tout au long de la production des maisons CIMEDE. En effet, optimiser l'utilisation des ressources engendre également des bénéfices supplémentaires.

3. Le placement du COMPRIHAND sur le profil des planchers et des éléments de toiture.

4. Les BLC sont plus couteux que les bois en KVH.

Pour ce faire, il faudrait déterminer le temps durant lequel la ressource ajoute de la valeur au produit et le temps pendant lequel elle ne crée pas de valeur. A partir de cette étude, des pistes d'optimisation visant à annihiler ce temps de non-crédation de valeur des ressources pourraient être proposées. A titre indicatif, le temps d'activité de certaines ressources a été montré dans les résultats⁵ montrant l'intérêt de mener plus loin l'analyse.

7.3 Pistes d'optimisation du système : Flux de production

De manière générale, l'amélioration du système correspond à améliorer le flux de production en atelier et sur chantier ainsi qu'entre les deux sites. De manière à atteindre cet objectif, il est nécessaire d'intervenir sur les temps de cycle des processus, soit en tentant d'évincer les sources de non création de valeur au sein des processus, soit en subdivisant le processus en deux sous-processus contenant chacun une partie des tâches du processus parent. Cette dernière proposition implique cependant l'emploi de plus de personnel ouvrier et d'un plus grand investissement en terme de moyens de travail. La difficulté est évidemment de faire en sorte que l'accroissement de la production soit plus important que celui des ressources investies de manière à ce que la productivité de l'entreprise soit augmentée.

7.3.1 Production

Au niveau de la production, on remarque un taux de création de valeur relativement faible, même si on ne considère pas les stocks de début et de fin de chaîne⁶. Il s'est avéré qu'il y avait énormément de stock, ou plutôt de temps d'inactivité de la part des ouvriers entre les différentes tâches des processus d'assemblage. Les solutions pour remédier à ces gaspillages semblent dans un premier temps être la motivation des ouvriers et bien leur faire comprendre l'intérêt de rester à un poste de travail durant quelques jours sans changer continuellement, de manière à augmenter leur productivité comme l'explique la courbe d'apprentissage du point théorique 2.2.1, à la page 8.

Par ailleurs, bien que les espaces de travail semblent déjà propres et bien organisés autour des tables d'assemblage, appliquer la méthode du 5S pourrait également être une piste d'amélioration de la productivité des ouvriers,

Par ailleurs, on s'est aperçu que le dernier processus d'assemblage des murs avait un temps de cycle très important, ce qui déséquilibre la production. De plus, le temps de cycle du processus d'assemblage devient énorme étant donné qu'il correspond au plus

5. Point 6.11, à la page 127

6. Stocks illustrés sur la figure 6.18, à la page 98.

grand temps de cycle des sous-processus qui le constituent. De manière à diminuer ce temps de cycle, il serait intéressant de faire passer par exemple la tâche de fixation définitive de la cornière dans le processus précédent de manière à faire passer le C/T du processus 4 d'assemblage à 219 minutes et celui du processus 5 à 303 minutes.

Cette modification fait que c'est le processus 1 de production, correspondant à l'assemblage de la structure sur la table 1, qui détient alors le plus grand temps de cycle, soit 330 minutes. Réaliser des éléments de structure pré-assemblés⁷, notamment pour la structure autour des baies de fenêtre, en amont de la table 1, semble être une piste de solution pour diminuer ce temps de cycle étant donné l'importance des temps d'assemblage de la structure comparés à ceux de pose et de fixation des panneaux d'OSB et de VIDIWALL.

En ce qui concerne les planchers, les C/T des processus de production en atelier sont également assez différenciés. Le C/T maximum des processus d'assemblage est aussi celui du processus d'assemblage de la structure sur la table 1, malgré le pré-assemblage des solives. Augmenter le pré-assemblage de la structure des planchers semble difficile étant donné que l'on perdrait le bénéfice des vérins pneumatiques de la table 1 permettant d'enserrer la structure avant de la fixer. Cependant, il peut être envisagé de préfixer les deux panneaux d'OSB ensemble de manière à ne pas devoir répéter cette tâche. Peut-être est-il également possible de revoir le dimensionnement des éléments de plancher et reconsidérer l'intérêt de deux panneaux d'OSB, ou est-il simplement possible de ne placer qu'un seul panneau d'OSB plus épais ?

De manière générale, une autre piste d'amélioration serait l'élaboration d'une ou plusieurs chaînes de production en parallèle de manière à diminuer le L/T et le C/T de la production d'une maison tout en conservant la conception du système telle qu'elle est. Cette proposition a d'ailleurs déjà été étudiée dans un travail de fin d'études antérieur portant sur l'élaboration du business plan de l'Atelier de l'Avenir [Duy11] et proposant différentes perspectives d'agrandissement de l'entreprise.

7.3.2 Montage structure

Le montage de la structure sur site, employant un personnel particulier⁸, détient un temps de cycle assez court par rapport au temps de production et de finition, malgré les problèmes de montage décelés au point 6.9.1, à la page 121. Cette réalité est clairement un objectif de la conception CIMEDE qui se veut être un système constructif basé sur *"une préfabrication en atelier maximisée pour une intervention sur chantier minimisée"* [dl13] de manière à optimiser les performances du produit grâce aux conditions d'assemblage maîtrisées en atelier. Cependant, ce faible temps de cycle de montage tend à déséquilibrer

7. Déjà d'application pour les planchers avec le processus 1 qui se déroule sur les tréteaux (cf. figure 6.22, page 101).

8. Monteurs Abraham

le système productif, notamment à cause du fait que l'entièreté de la maison doit être produite avant de pouvoir être acheminée sur chantier pour être montée.

Il serait peut-être possible d'acheminer sur chantier des éléments de structure plus régulièrement afin d'éviter de devoir attendre que tous les éléments structuraux de la maison soient produits avant de pouvoir réaliser le transport et le montage du bâtiment CIMEDE. Dès que les éléments d'un niveau sont produits, e.g., tous les murs du RDC, ils peuvent peut-être déjà être acheminés et montés sur chantier pendant que les planchers sont encore en cours de production, et ainsi de suite. Cependant, une telle organisation nécessiterait une étanchéité temporaire de la structure, le temps que les éléments structuraux suivants arrivent sur chantier, de manière à ne pas perdre le bénéfice de la préfabrication à propos de la rapidité de l'exécution de l'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment sur chantier⁹

Une autre réflexion peut être menée à ce sujet. Il serait peut-être possible de transférer certaines tâches réalisées en atelier sur chantier de manière à diminuer le travail effectué en atelier et à augmenter l'intervention sur chantier pour améliorer le flux de travail entre les deux sites. Pour assurer une étanchéité rapide du bâtiment, la structure et l'étanchéité pourraient être uniquement effectuées en atelier et l'isolation pourrait être réalisée sur chantier. De manière à conserver la préfabrication comme gage de qualité, l'isolation pourrait, par exemple, être réalisée en atelier via des panneaux sandwichs préfabriqués venant s'intercaler entre les montants de la structure sur chantier. De plus, cette modification pousserait encore plus loin l'aspect modulaire du système CIMEDE, qui, rappelons-le, est l'un des objectifs phares du système. Un inconvénient qui apparaît directement est la complexité du système constructif qui s'accroît ainsi que la quantité de matériaux investie et les coûts supplémentaires générés.

7.3.3 Finitions

A propos des finitions, il s'est avéré qu'une grande perte de temps était générée par une désorganisation de l'intervention des différents corps de métier. Une optimisation qui peut être apportée au système pour corriger ce mauvais flux de travail entre les différents postes semble être dans un premier temps une meilleure subdivision des espaces de travail afin de faciliter un meilleur séquençement de l'intervention des corps de métier. De cette manière, il est possible de rééquilibrer les C/T des différents processus¹⁰ permettant une planification simplifiée et plus régulière de l'intervention des corps de métier extérieurs à l'entreprise sur les chantier CIMEDE, certaines fois contraints par leurs activités sur d'autres chantier ne participant pas au système CIMEDE. D'un point de vue général,

9. Cette remarque est due à la météo de la Belgique dont le climat est de type tempéré humide et auquel il est préférable de ne pas exposer l'intérieur de la structure CIMEDE étant donné l'incompatibilité des panneaux de plâtre avec l'humidité.

10. Comme il a été montré au point 6.10, à la page 125.

cette amélioration permettrait également d'optimiser le flux de travail entre l'atelier et le chantier.

D'autre part, les corps de métier externes à l'entreprise n'interviennent qu'à peu près 35% du temps sur les finitions d'un bâtiment¹¹, le reste étant assuré par les ouvriers de l'Atelier de l'Avenir. Afin de faciliter le rééquilibrage des C/T des processus de finition, et étant donné la faible implication des corps de métier extérieurs à l'Atelier de l'Avenir sur les chantiers CIMEDE, ne serait-il pas judicieux que les différentes disciplines de la construction soient représentées à l'intérieur de l'entreprise ? De cette manière, l'interaction et la communication entre les ouvriers s'en trouveraient également améliorées.

7.4 Piste d'optimisation du système : Flux de l'information

Une autre piste d'amélioration du système est la transmission de l'information, aussi bien au sein de l'atelier et au sein d'un chantier, qu'entre les deux sites. En effet, un problème sur chantier doit être relayé le plus rapidement possible en amont de la chaîne de manière à pouvoir intervenir le plus rapidement possible sur le processus générant le problème et de manière à répéter le moins possible ce dernier. Il apparaît que le flux d'informations au sein du système CIMEDE ne soit pas encore optimisé comme le prouve la cartographie globale du système, montrant une gestion statique de la production assurée par le poste de contrôle, visible au point 6.8.1, à la page 117.

7.4.1 Atelier de production

Au sein de l'atelier, il semble que l'utilisation du système *kanban* au sens propre du terme ne soit pas justifiée étant donné la petitesse de la ligne de production actuelle de l'Atelier de l'Avenir permettant de voir toute la chaîne de production à partir de n'importe quel point du hall d'assemblage. Cependant, si l'entreprise s'agrandit et que d'autres lignes de production naissent parallèlement à la première, la mise en place d'un système *kanban* s'avèrera sans doute utile étant donné l'éventuelle rupture du contact visuel entre tous les postes de travail.

Par contre, une autre optimisation qui semble être plus intéressante à réaliser pour le moment, en terme de flux d'informations, est le relais au poste de contrôle de l'apparition d'un problème sur la ligne de production. En effet, pour le moment, le seul moyen d'information est la voix, ou alors les ouvriers doivent venir chaque fois dans le poste de contrôle pour avertir le chef de production du problème sur la ligne. Un système de type *andon*¹² semble approprié pour régler ce soucis rapide de relais d'un problème. De plus,

11. Comme le montre les résultats concernant les finitions intérieures de l'annexe B, à la page 149.

12. Système exposé dans la théorie au point 2.2.2, à la page 16.

un dispositif visuel semble tout à fait adapté pour des personnes sourdes, qui, rappelons le, représentent la majorité du personnel ouvrier de l'Atelier de l'Avenir.

7.4.2 Chantier

Au niveau du chantier, le flux d'information se déroule de manière visuelle directement entre les ouvriers sur site. A priori, il ne semble pas y avoir d'amélioration à apporter au flux d'information du montage de la structure sur chantier étant donné le faible nombre d'ouvriers présents sur les lieux durant le montage.

Par contre, en ce qui concerne les finitions, il y a sans doute une intervention à effectuer étant donné la participation d'un grand nombre de personnes sur le bâtiment. Une quantité importante d'informations transite donc inévitablement entre chaque équipe de travail. De manière à éviter que ces informations ne soient répétées des dizaines de fois ou, pire, qu'elles se perdent au fur et à mesure de l'avancement du chantier, générant des incohérences, des retards de livraisons, etc. pouvant mener à des conséquences de grande ampleur parfois¹³, un outil informatique tel que le BIM, enregistrant les informations de chaque étape du processus de finition du bâtiment, pourrait sans doute trouver ici un intérêt. En effet, concrètement, chaque corps de métier pourrait valider sur une tablette numérique l'achèvement de sa tâche de manière à inviter l'équipe de travail suivante à intervenir sur l'espace du bâtiment en cours de transformation.

7.4.3 Lien entre le chantier et l'Atelier

La plus grande difficulté semble être le flux d'information entre le chantier et le hall de production permettant d'avertir quand le processus de montage de la structure est prêt à recevoir le produit du processus d'assemblage en amont. De plus, ce flux d'information doit également permettre l'avertissement en amont d'un problème encouru en aval dû à un défaut de fabrication. Il semble qu'il n'y ait pas beaucoup de solutions optimales pour assurer cette tâche, si ce n'est un outil informatique utilisant Internet étant donné la distance existant entre le chantier et le hall de production¹⁴.

Quoi qu'il en soit, il est impératif que ce flux d'information soit fiable de manière à ce que le processus le plus en aval puisse, dans une optique *lean*, donner le rythme de production¹⁵ et que cette tâche n'incombe plus au poste de contrôle imposant de manière statique à chaque processus un rythme de travail ne correspondant pas immédiatement

13. Les résultats ont montré la répétition de la production d'un lot entier de cloisons étant donné un défaut de dimensions suite à une modification de la hauteur du sol réalisée par le chapiste (cf. point 6.9.2, page 124).

14. Le rayon d'action de l'Atelier de l'Avenir peut aller jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres.

15. Ce processus est appelé *pacemaker process* (cf.2.4.4, page 36).

à la demande du client. Si ce flux d'information est fiable, il suffira que le poste de contrôle programme uniquement le *pacemaker process* pour programmer l'entièreté de la production. Dans notre cas, le *pacemaker process* sera le processus relatif aux finitions électriques, tel qu'il est présenté au point 6.7, à la page 115.

7.5 Contrôle de qualité

Bien que la courbe d'apprentissage nous montre l'intérêt de ne changer de type de production qu'après un certain temps, il ne semble cependant pas inintéressant de se poser la question de l'alternance des biens produits visant à éviter l'apparition répétée de défauts sur un important lot de produits. Pour parer à ce problème, il est également important de réaliser des contrôles de qualité. La représentation de la production globale du système CIMEDE a démontré qu'une très faible énergie était consacrée au contrôle de la qualité des produits semi-finis. Il serait cependant possible d'imaginer la réalisation d'un protocole de contrôle à appliquer à la fin de chaque processus d'assemblage visant à vérifier la qualité des produits en cours de transformation.

7.6 Standardisation

Enfin, une dernière remarque à apporter aux résultats est le fait que, bien que le C/T de la production globale peut être optimisé, le L/T de la production d'une maison, même si toutes les sources de gaspillage du système sont éradiquées, représentera, pour le système CIMEDE, le temps total d'attente du client. En effet, le système CIMEDE offre le moyen de personnaliser la maison à partir du tout début de la production, empêchant ainsi la standardisation des éléments. L'utilisation importante de lien FIFO dans la modélisation du flux de valeur du système CIMEDE appuie d'ailleurs cette évidence.

D'autre part, pousser la standardisation des éléments structuraux d'un système constructif le plus loin possible dans la production limite ensuite la personnalisation du bien, mais diminue également le temps d'attente du client, comme l'a illustré l'étude évoquée dans l'état de l'art au point 3.3, à la page 52.

Le choix de l'endroit auquel la personnalisation du client arrive dans la production se réalise sur base des objectifs du système constructif. Cependant, il est sans doute possible de standardiser un minimum le système CIMEDE de manière à diminuer le temps d'attente du client tout en évitant de limiter la personnalisation du bien par le client, notamment par le pré-assemblage d'éléments constitutifs des murs et des planchers CIMEDE.

Chapitre 8

Conclusion

8.1 Rappel de la problématique

Le secteur de la construction est un domaine connu pour sa faible productivité, comparé à celle que les manufactures peuvent connaître, notamment celles appliquant la méthode *lean* en leur sein. Ces gaspillages de ressources sont dûs à une organisation peu coordonnée sur les chantiers engendrant beaucoup de tâches à réaliser n'ajoutant pas de valeur directement aux constructions, telles que les transports superflus, les stocks de matériaux, les défauts de fabrication, les temps d'attente des ressources, etc.

Certains chercheurs se sont alors posé la question de l'applicabilité des principes *lean* à des projets de construction de manière à améliorer leur productivité en tentant de diminuer les gaspillages sur chantier.

D'autres ont envisagé la mise au point de systèmes constructifs tirant parti des bienfaits de la production à la chaîne des manufactures pour créer alors des systèmes constructifs industrialisés de bâtiments.

L'objectif de ce travail était de tester l'association des principes du *lean* à un de ces systèmes constructifs industrialisés de bâtiments à travers l'étude d'un cas correspondant au projet de recherche CIMEDE de manière à évaluer la performance d'une telle association.

8.2 Contenu

Dans un premier temps, nous avons vu toute la théorie concernant la productivité, autant en usine que sur chantier, et les outils développés à l'heure actuelle pour tenter d'accroître cette productivité. Nous avons de plus vu la signification exacte de la notion de *lean* et les mesures organisationnelles qu'elle engendre de manière à ne produire que ce qui est vendu et à ce que ce soit le consommateur qui dicte le rythme de la production via le *takt time*.

Ensuite, nous avons pris connaissance des recherches déjà effectuées dans le domaine du *lean construction* et de la mesure de la productivité sur des systèmes constructifs industrialisés de bâtiments. Par après, une description détaillée du système CIMEDE et de la méthodologie d'étude employée a permis d'obtenir des résultats permettant la modélisation du système CIMEDE.

8.3 Système CIMEDE

La description du système CIMEDE a permis de mettre en avant la complexité et le taux de finition du système au niveau des performances techniques. La définition des compositions de base et des options envisageables prouvent déjà la diversité du système.

Concernant la démarche entreprise en vue de récolter les résultats, celle-ci s'est avérée efficace. Les vidéos du montage du chantier ont permis une visualisation a posteriori des processus de montage permettant de corriger certaines mesures fautives ou de compléter certaines mesures manquantes. Les visites régulières en entreprise et sur chantier ainsi que les questions posées aux employés de l'Atelier de l'Avenir ont permis également d'obtenir des résultats complets et des réponses précises. Une modélisation fouillée du système a pu être menée à bien sur base de la récolte de cette importante quantité d'informations.

Nous avons pu nous rendre compte par ailleurs de la complexité de la modélisation suite à la diversité des produits. On pourrait à ce niveau déjà se poser la question de ce qu'il en serait de la modélisation d'un projet de construction traditionnelle appliquant les principes du *lean* pour lequel les unités de production sont loin d'être standards ?

En ce qui concerne les résultats, la cartographie des flux de valeur a permis de montrer que le système CIMEDE souffre encore d'un trop grand taux de non-crédation de valeur et d'un mauvais flux de travail, surtout entre l'atelier et le chantier. En effet, on ne retrouve pas de synchronisation entre les trois macro-processus, comme l'ont démontré les C/T de chacun d'eux. De plus, les finitions prennent énormément de temps et l'on y déce le énormément de gaspillage, principalement dû au manque de synchronisation des corps de métier intervenant sur le bâtiment et au fait que le bâtiment n'est pas divisé en sous-

espaces de travail. De plus, le déséquilibre entre les C/T de la production, du montage sur chantier et des finitions ne permettent pas de rencontrer la demande du client basée sur le carnet de commandes de l'année 2013.

Par ailleurs, au vu de la discussion entreprise, on peut voir que les opportunités sont énormes en ce qui concerne l'amélioration de la productivité de ce jeune projet. En effet, il a été vu que la mise en œuvre d'un flux tiré de production était largement possible tant la conception du système est saine et bien maîtrisée. La simplicité des structures permet également un large rayon d'action en ce qui concerne le transfert d'une tâche vers un autre processus. L'amélioration continue du système est également rendue possible grâce à cette conception simple.

L'étude du système CIMEDE a de plus mis en évidence l'intérêt de porter une attention particulière à l'amélioration de l'entièreté du système et non à un seul processus particulier, comme le veut la méthode *lean*. De plus, l'étude a permis de mettre en avant l'importance de la reconsidération de la conception afin de faciliter les processus aval, mais, également, de l'influence de la modification d'un processus sur les autres.

8.4 Association du lean et d'un système de construction industrialisé

L'analyse du système CIMEDE a permis de mettre en avant le fait qu'il semble que l'application du *lean* avec un système constructif industrialisé de bâtiment soit très efficace. En effet, ces deux concepts sont tout à fait compatibles et se marient très bien en vue d'améliorer la productivité en usine et sur chantier d'un système constructif industrialisé.

Un pilier semble manquer cependant. En effet, on s'est aperçu que le flux d'information restait difficile entre l'atelier et le terrain, notamment en ce qui concerne le relais de l'apparition d'un problème sur chantier en aval de la ligne de production. Il semble qu'un outil de communication adéquat doit être mis en place de manière à équilibrer le système encore plus. Il a été évoqué supra qu'un outil informatique tel que le BIM semble être une bonne solution.

De prime abord, l'association du *lean* et d'un système constructif industrialisé de bâtiment accompagné du BIM semble être un trio stable dans l'élaboration de bâtiments à la chaîne. Une étude plus approfondie à ce sujet semble ne pas être dénuée d'intérêt.

8.5 Perspective

Le système CIMEDE se veut être un système cherchant à maximiser la préfabrication pour minimiser l'intervention sur chantier de manière à maximiser les performances techniques du système. Cette optique semble être l'autre extrême de la construction traditionnelle pour laquelle l'intervention en usine est minimale et l'intervention sur chantier est maximale. Les C/T de production du système CIMEDE sont déséquilibrés, comme l'étude supra l'a démontré, et ce déséquilibre empêche un bon flux de travail tout au long de la production du bâtiment, depuis l'assemblage jusqu'aux finitions. Trouver un juste milieu en transférant des tâches de processus se déroulant en atelier à des processus d'exécution sur chantier, comme, e.g., la proposition de panneaux sandwichs isolants à appliquer sur chantier. Mais cette conception assurera-t-elle toujours la performance technique du système CIMEDE? Comment relier efficacement cet objectif de performance avec l'objectif de l'optimisation du flux de production en usine et sur chantier du système constructif industrialisé de bâtiment CIMEDE?

Annexe A

Définitions

5S - Five-Step plan : Cette méthode reprend 5 opérations à effectuer sur chaque poste de travail d'une ligne de production ou sur un chantier de manière à assainir le plus possible l'environnement de travail.

5-Whys : Méthode d'analyse des problèmes consistant à poser la question suivante "Pourquoi se problème apparaît-il ?" et à y répondre 5 fois consécutivement de manière à déceler la vraie source du problème ou du moins de s'en rapprocher [Ohn88].

Andon : *"Système de contrôle visuel installé dans un atelier, composé d'un tableau électronique suspendu visualisant la situation des opérations de production et signalant les problèmes dès leur apparition", selon [WJ09], cité par [Bal04].*

BIM : Le *BIM (Building Information Modelling)* est un logiciel permettant de modéliser une construction. Cet outil permet également de communiquer et d'analyser ces modèles. Il gère et produit les données propres au bâtiment construit [MAM12].

BLC : Initiales de "Bois Lamellé Collé". Le bois lamellé collé est bois constitué de planches en résineux séchées, collées, pressées et aboutées de manière à obtenir un *"produit dont la variabilité est plus faible que celle du bois massif"* [Fra12].

Capacité : La capacité est la quantité de travail maximale qu'un processus peut réaliser dans des conditions données, avec un équipement donné, suivant une méthode donnée, en un temps donné [Bal99].

Cartographie des flux de valeur : La cartographie des flux de valeur, *Value Stream Mapping* - VSM en anglais, est un outil nécessaire à l'application du *lean*. Elle représente de manière schématique le flux de valeur transitant sur une ligne de production.

Changeover time : Le *changeover time* est le temps nécessaire pour régler une machine en vue de changer de type de produits à fabriquer. Ce temps s'applique aux machines multi-fonctionnelles permettant la production de biens diversifiés [RS03].

Charge : La charge est le rythme de travail imposé à un processus. Charger un processus à 100% revient à faire coïncider la capacité avec le débit [Bal99].

Cycle time : "Temps de cycle" en français (C/T). Le temps de cycle est le rythme de production d'un processus. C'est le temps entre deux états identiques du processus [RS03].

Débit : Le débit ou rythme de production détermine la quantité de produits sortant d'un processus sur un certain laps de temps [Bal99].

En-cours : "*Ce qui, dans une entreprise, est en train de subir une opération ; matières et produits se trouvant dans l'atelier avant et après les opérations, et non dans les magasins*" [Lar12].

Flux : "*Éléments circulant dans l'entreprise et destinés à être utilisés et transformés au cours du cycle d'exploitation*" [Lar12].

Flux continu : Le flux continu, ou flux tendu, dépeint une suite d'opérations consécutives sur un produit sans interruption de ce dernier entre chaque opération.

Flux de valeur : Dans une chaîne de production, certains processus ajoutent de la valeur, d'autres n'en ajoutent pas. Pour améliorer le flux de valeur, il est nécessaire de trouver les moyens de supprimer les tâches qui n'ajoutent pas de valeur au produit [ARWYWL12].

Flux poussé : "Push system" en anglais, synonyme de production de masse. Le flux poussé définit un système de production dans lequel la production est dictée par les prévisions du marché [FA10].

Flux tiré : "Pull system" en anglais, synonyme de production au plus juste. Le flux tiré définit un système dans lequel la production répond à la demande actuelle du consommateur [FA10].

Gaspillage : "*Les gaspillages recouvrent tout ce qui ajoute des coûts, et n'apporte pas de valeur pour le client*" [DMR04].

Jidoka : Aide à la détection des anomalies dans la production. Synonyme du mot "autonomation", néologisme créé par la contraction d'"autonomie" et d'"automatisation", "*jidoka*" veut dire "*la séparation des hommes et des machines*" [Bal04].

Just-In-Time : "Juste-à-temps" en français (JIT). Le *Just-In-Time* est une méthode de production visant à produire uniquement ce qui est vendu et/ou ce qu'on consomme limitant les stocks et l'accumulation d'en-cours sur la ligne de production [RS03].

Kanban : "Etiquette" en français, ce mot japonais désigne un système de régulation du flux de l'information sur une ligne de production [RS03].

Kaizen : Techniques visant à l'amélioration continue d'une ligne de production [RS03].

Last Planner® System : "Système du dernier planificateur" en français (LPS). Cet outil, développé par Ballard initialement, est un outil collaboratif de planification permettant de tenir compte à la fois de ce qui devrait être fait et ce qui peut être fait sur base de l'état d'avancement du chantier [FA10].

Lead Time : "Délais de livraison" en français (L/T). Ce temps est le temps compris entre la première et la dernière transformation d'un bien de consommation. Le *lead time* est la somme du temps de création de valeur et du temps de non-crédation de valeur (stockage, transport, etc.) [RS03].

Lean : Terme créé pour définir une ligne de production produisant uniquement ce dont le client à besoin visant à diminuer les stockages de matériaux et/ou de produits finis.

Manque de flexibilité : *"Le manque de flexibilité désigne tout obstacle qui empêche de répondre aux évolutions de la demande des clients"* [DMR04].

Master Schedule : "Calendrier principal" en français. C'est un outil du LPS montrant une vue d'ensemble des principales phases d'un projet de construction. Une représentation de Gantt et un métré approximatif accompagnent généralement le *Master Schedule* [FA10].

Open-Building : Système organisationnel visant à diviser un bâtiment en construction en zones sur lesquelles les corps de métier peuvent travailler de manière séquencée [Kos92].

OSB : Initiales de *"Oriented Strand Board"*, ces panneaux *"sont constitués de particules qui ont la forme de plaquettes rectangulaires ... On obtient ainsi des résistances très élevées dans le sens d'orientation préférentiel des plaquettes ... La résistance à l'humidité est également meilleure que celle des panneaux de fibres ou de particules, ce qui fait que les panneaux OSB conviennent bien aux applications structurales dans la construction."* [Fra12]

Pacemaker process : Processus conditionnant le rythme de la production. Un tel processus se retrouve généralement en fin de chaîne.

Percentage of Projects Complete - PPC : Le PPC est un outil utile à la mesure de l'état d'avancement d'une tâche. Il se calcule en pourcent, l'achèvement total d'une tâche valant 100%.

Planning Gantt : La représentation Gantt, provenant du nom de son créateur, Henry Laurence Gantt, est une représentation visuelle de la planification d'un projet. Les tâches à réaliser y sont représentées verticalement et la ligne du temps, horizontalement. Cet outil peut être complété des ressources nécessaires à la réalisation des tâches [KR12].

Processus : Un processus est une boîte dans laquelle entrent des matières premières ou des produits semi-finis et de laquelle sortent des produits semis-finis ou des produits finis, suivant le niveau d'analyse, et dans laquelle le produit acquiert de la valeur suite

à une ou plusieurs transformations. Un personnel ouvrier plus ou moins important est assigné à chaque processus.

Productivité : *"La productivité est le rapport entre le résultat (output) d'une activité ... et les efforts ou les moyens qui ont permis de l'obtenir (input), à condition que le numérateur et le dénominateur soit mesurables"* [LA76].

Projet : *"Un projet est une articulation de ressources intellectuelles, humaines et matérielles agencées dans une organisation temporaire dans le but d'atteindre un objectif caractérisé par un coût, un délai et des performances"* [Kub12].

Stock : *"Ensemble des marchandises, des matières ou fournitures, des déchets, des produits semi-ouvrés, des produits finis, des produits ou travaux en cours et des emballages commerciaux qui sont la propriété de l'entreprise"* [Lar12].

TPS : *"Toyota Production System"*. Ce terme traduit l'innovation organisationnelle de l'entreprise TOYOTA dans sa gestion de la production de biens de consommation [FA10].

Unité de production : Produit semi-fini subissant une transformation lors d'un processus de production.

Valeur : *"La valeur est l'estimation du service ou produit fourni au client, tel qu'il le définit. Il existe deux types de valeurs : la valeur ajoutée et la non valeur ajoutée"* [Gar10].

Valeur ajoutée : *"La valeur ajoutée correspond à toutes activités qui augmentent la valeur (marchande ou fonctionnelle) du produit aux yeux du client, i.e., les activités pour lesquelles le client est prêt à payer"* [Gar10].

Valeur non ajoutée : *"La non valeur ajoutée représente les activités qui n'ajoutent aucune valeur au produit, ce sont des sources de gaspillage. Certaines de ces activités ne peuvent pas être évitées (sauf investissements importants)"* [Gar10].

Value Creating Time : *"Temps de création de valeur"* en français (VC/T). Ce temps est le temps lors duquel de la valeur est réellement ajoutée au produit semi-fini en cours

de transformation (perçage, assemblage, etc.). Ce temps est celui pour lequel le client devrait réellement payer [RS03].

Variabilité : *"La variabilité correspond à tout écart dans la qualité d'un service ou d'un produit par rapport au niveau standard"* [DMR04].

Annexe B

Tableaux de prise de temps

B.1 Code couleur

Dans les tableaux qui suivent, différentes couleurs sont utilisées. Leur signification sont les suivantes :

- **Bleu** : Le bleu représente les processus qui n'ont pas toujours lieu. Il s'agit de tâches nécessaires à la récupération a posteriori d'un défaut sur le produit semi-fini. Comme l'indique la description des différents types de gaspillage¹, les défauts de fabrication sont contre-productifs et nécessitent d'être évincés.
- **Rouge** : La couleur rouge met en évidence les temps d'attente nécessaires avant le passage du produit semi-fini sur la prochaine table d'assemblage lorsque le produit semi-fini précédent est fini. Ces stocks sont dûs au déséquilibre des temps d'assemblage des différentes tables.
- **Orange** : L'orange met en avant les processus pour lesquels un temps n'a pu être mesuré et qui a donc été estimé en concertation avec l'Atelier de l'Avenir.

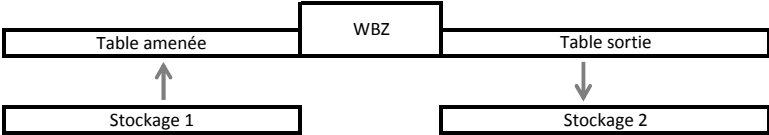
1. Point 2.2.2, page 10

Elément	Mur					
Processus 1	Mise à forme d'un montant					
Sous-processus	Durée [min]	Unité	Quantité	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Mise à longueur	0,5	[Montant]	17	2	AdM	Machine = centre usinage WBZ
Défonçage montant extrémité	7	[Montant]	1	2	AdM	WBZ ; 1 défonçage par mur en moyenne
Rainure pour baie	0,75	[Rainure]	4	2	AdM	WBZ ; 1 baie en moyenne par mur = 4 rainures
Total	18,5					

Processus 2	Mise à forme lisse					
Sous-processus	Durée [min]	Unité	Quantité	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Mise à longueur	1	[lisse]	2	2	AdM	WBZ; rainure en demi-lune faite en sous traitance à Méry Bois
Rainure pour montant	1	[rainure]	34	2	AdM	WBZ ; 2 * 17 rainures
Total	36					

Processus 3	Mise à forme traverses baies					
Sous-processus	Durée [min]	Unité	Quantité	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Mise à longueur	0,5	[traverse]	2	2	AdM	WBZ ; 1 baie en moyenne par mur = 2 traverses
Rainure pour montant	1	[rainure]	4	2	AdM	WBZ ; 1 baie de 120 cm de large ; Delta montant = 40 cm
Total	5					

Usinage mur C/T				
Tâches	Temps	Unité		
Mise à forme montant	18,5	[min/mur]	Hauteur mur	3 [m]
Mise à forme lisse	36	[min/mur]	Longueur mur	7,5 [m]
Mise à forme traverses baie	5	[min/mur]	Entre-distance montants	0,4 [m]
Total	59,5	[min/mur]	Epaisseur montant	0,063 [m]
			Nombre montants	17 [-]



Elément	Cloison				Rôles des ouvriers	Remarques
Processus 1	Mise à forme des montants					
Sous-processus	Durée [min]	Unité	Quantité	Nbre d'ouvriers		
Réglage machine Weinig 1 + prévision colisage	1,8	[montant - 2500 mm]	2	1	AdM - ouvrier	Colisage pour bois usinés et prévoir 3h pour régler la machine pour une production de l'équivalent de 100 cloisons
Rabotage 4 faces	0,5	[montant - 2500 mm]	2	2	AdM - ouvriers	10mc/minute
Mise à longueur	0,75	[montant - 2500 mm]	2	2	AdM - ouvriers	300 pcs/(hrs*2hommes); montant de 2,5 m
Batée aux extrémités		[montant - 2500 mm]	2	2	AdM - ouvriers	Réalisation à la toupie : 2'/montant ; Emploi double tenonneuse (grande série) : réalisation 2 batées et mise à longueur en 1 fois (temps estimé/montant = +/- 45 sec)

Processus 2	Mise à forme lisse basse					
Sous-processus	Durée [min]	Unité	Quantité	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Rabotage et défonçage	0,1	[lisse - 600 mm]	1	2	AdM - ouvriers	6"/600 mm
Mise à longueur	0,2	[lisse - 600 mm]	1	2	AdM - ouvriers	300 pcs/(hrs*2hommes)
2 trous à percer	0,66666667	[lisse - 600 mm]	1	1	AdM - ouvriers	20"/trou ; 2 trous
Total	0,96666667					

Processus 3	Mise à forme lisse haute					
Sous-processus	Durée [min]	Unité	Quantité	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Rabotage 4 faces	0,1	[lisse - 600 mm]	1	2	AdM - ouvriers	6"/600 mm
Mise à longueur	0,2	[lisse - 600 mm]	1	2	AdM - ouvriers	300 pcs/(hrs*2hommes)
L/T	0,3					

Processus 4	Mise à forme traverses intermédiaires					
Sous-processus	Durée [min]	Unité	Quantité	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Mise à longueur	0,2	[traverse - 600mm]	3	2	AdM - ouvriers	300 pcs/(hrs*2hommes)
L/T	0,6					

Processus 5	Mise à forme panneaux plâtre					
Sous-processus	Durée [min]	Unité	Quantité	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Mise à longueur	0,5	[plaque]	2	1	ADM - ouvriers	Temps pour découpe et manipulation
L/T	1					

Usinage cloison L/T - C/T		
Tâches	Temps	Unité
Mise à forme des montants	6,1	[min/cloison]
Mise à forme lisse basse	0,96666667	[min/cloison]
Mise à forme lisse haute	0,3	[min/cloison]
Mise à forme traverses intermédiaires	0,6	[min/cloison]
Mise à forme panneaux plâtre	1	[min/cloison]
Total (C/T)	8,96666667	[min/cloison]
Nombre de cloisons	60	[cloison]
Total (L/T)	538	[min/maison]

Temps d'usinage pour les cloisons - AdM - Page 1 de 1

Elément	Cloison					
Processus 1	Assemblage structure bois					
Sous-processus	Durée [min]	Unité	Quantité	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Mettre les bois sur la table	0,285714286	[élément]	7	1	AdM - ouvrier	2'/placement des 7 éléments d'1 cloison sur gabarit
Préforage des éléments	0,166666667	[trou]	10	1	AdM - ouvrier	diam. 4mm, 10 trous ; 100"/10 trous
Vis dans les coins	0,25	[vis]	4	1	AdM - ouvrier	Assemblage du cadre vis longueur 160 mm diam. 5 m ; 1 vis par coin, 4 coins, 15"/vis
Agraffes coin traverse	0,0625	[agrafe]	12	1	AdM - ouvrier	4 agrafes/traverse. Dans les coins dans l'épaisseur de la cloison ; 15"/4 agraffes
Vis traverses	0,25	[vis]	6	1	AdM - ouvrier	Vis longueur 160 mm diam. 5 mm ; 2 vis/traverse ; 15"/vis
Total	6,916666667					

Processus 2	Fixation plaque de plâtre (1 coté)					
Sous-processus	Durée [min]	Unité	Quantité	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Mettre la plaque de plâtre sur table	0,16666667	[plaque]	1	1	AdM - ouvrier	10"/plaque
Fixation plaque	0,06666667	[vis]	24	1	AdM - ouvrier	Vis de 40 mm ; espacement +- 200 mm ; 24 vis par plaque ; 4"/vis
Total	1,76666667					

Processus 3	Placement isolant					
Sous-processus	Durée [min]	Nbre d'ouvriers	Quantité	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Retournement cloison	1	[cloison]	1	1	AdM - ouvrier	1'/cloison
Placement isolant	4	[cloison]	1	1	AdM - ouvrier	Découpe nécessaire au préalable au cutter ; 4'/cloison
Total	5					

Processus 4	Fixation plaque de plâtre (2ème coté)					
Sous-processus	Durée [min]	Nbre d'ouvriers	Quantité	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Mettre la plaque de plâtre sur table	0,16666667	[plaque]	1	1	AdM - ouvrier	10"/plaque
Fixation plaque	0,06666667	[vis]	24	1	AdM - ouvrier	Vis de 40 mm ; espacement +- 200 mm ; 24 vis par plaque ; 4"/vis
Total	1,76666667					

Usinage cloison L/T - C/T		
Tâches	Temps	Unité
Assemblage structure bois	6,91666667	[min/cloison]
Fixation plaque de plâtre (1 coté)	1,76666667	[min/cloison]
Placement isolant	5	[min/cloison]
Fixation plaque de plâtre (2ème coté)	1,76666667	[min/cloison]
Total (C/T)	15,45	[min/cloison]
Nombre de cloisons	60	[cloison]
Total (L/T)	927	[min/maison]

Temps d'assemblage des cloisons - AdM - Page 1 de 1

Elément	Mur									
Quantité	1 pièce									
Processus 1	Table 1		Face intérieure							
	Début				Fin					
Sous-processus	h	m	h	m	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques	
Disposition structure	11	45	13	26	71	0	2	AA - ouvriers	Pause 12h00 à 12h30	
Agrafage structure	13	26	14	12	46	7	2	AA - ouvriers		
Pose OSB	14	19	15	39	65	42	2	AA - ouvriers	Pause 15h00 à 15h15; Fin de journée 16h20	
Fixation OSB	7	41	7	51	10	0	1	AA - opérateur	Début journée 7h40	
Découpe OSB	7	51	7	54	3	37	1	AA - opérateur		
Pose 1ère plaque de plâtre	8	31	8	44	13	5	2	AA - ouvriers		
Fixation 1ère plaque de plâtre	8	49	8	55	6	6	1	AA - opérateur	Pause 9h00 à 9h15	
Découpe 1ère plaque de plâtre	9	16	9	19	3	3	1	AA - opérateur		
Etanchéité air	10	32	10	42	10	1	3	AA - ouvriers	Membrane, agrafe, marteau sur agrafe, toile isolante	
Retournement	10	43	10	45	2	0	1	AA - opérateur	Face int => ext	
Mesures du processus										
VC/T	L/T	C/T	Unité		(VC/T)/(L/T)	Unité				
227	330	330	[min]		69%	[%]				

Elément	Mur									
Quantité	1 pièce									
Processus 2	Table 2		Face extérieure							
	Début			Fin						
Sous-processus	h	m	h	m	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques	
Stock avant processus	10	45	10	47	2	0				
Contrôle	10	47	10	48	1	0	1	AA - ouvrier	Contrôle de la rectitude des montants : agrafage par le dessus si pas bon	
Agrafage structure					0	0			N'a lieu que si le contrôle est négatif	
Isolant Knauff	10	48	11	29	41	55	2	AA - ouviers	3,5 rouleaux pour un mur; Pause 12h00 à 12h30	
Marquage bois	12	54	12	59	5	0	1	AA - ouvier	Marquage sur montant pour finitions dans magasin et fixation cornières métalliques	
Inserts métalliques	12	59	13	20	21	52	1	AA - ouvier	2 inserts	
Stock d'attente	0	0	0	0	98					
Passage sur table 3 et alignement vers axe du pont	14	12	14	16	4	0	2	AA - ouvrier		
Mesures du processus										
VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité					
67	279	279	[min]	24%	[%]					

Elément	Mur										
Quantité	1 pièce										
Processus 3	Table 3		Face extérieure								
			Début				Fin				
Sous-processus	h	m	h	m	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques		
Stock avant processus	14	16	14	23	7	0					
Pose Vidiwall	14	23	15	59	81	7	2	AA - ouvriers	Pause 15h00 à 15h15		
Fixation Vidiwall	16	6	16	15	9	20	1	AA - opérateur	WMS ; fin de journée 16h30		
Découpe Vidiwall	7	50	8	16	26	2	1	AA - opérateur	Début travail 7h45		
Etanchéité eau	8	18	8	24	6	3	2	AA - ouvriers			
Pose Pare pluie	8	27	9	27	45	18	2	AA - ouvriers	Pause 9h00 - 9h15. Problème fichier => perte de temps		
Fixation pare pluie	9	45	9	52	7	1	1	AA - opérateur			
Découpe pare pluie	9	53	10	18	25	16	1	AA - opérateur	Problème de vibration du pont multifonction : défaut. Finition de la découpe à la main		
Passage sur table magasin	10	34	10	40	6	0	2	AA - ouvriers			
Mesures du processus											
VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité						
199	279	279	[min]	71%	[%]						

Elément	Mur									
Quantité	1 pièce									
Processus 4	Table levante magasin		Face extérieure							
	Début				Fin					
Sous-processus	h	m	h	m	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques	
Stock avant processus	10	40	11	27	47	0				
Fixation barres métalliques	11	27	11	37	10	4	2	AA - ouvriers		
Fixation des Knapp	11	41	11	49	8	3	2	AA - ouvriers		
Pré-fixation des cornières	0	0	0	0	35	2	2	AA - ouvriers	1 tire-fond sur les 4 dans chaque montant en KVH	
Levage table et passage dans magasin	11	51	11	56	5	0	2	AA - ouvriers		
Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus							
Temps		Unité	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité		
477		[min]	43	114	114	[min]	38%	[%]		

Elément	Mur
Quantité	1 pièce
Processus 5	Magasin

	Début		Fin						
Sous-processus	h	m	h	m	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Stock avant processus	0	0	0	0	3	0			
Pose châssis	0	0	0	0	300	183	2	AA - ouvriers	Préparation cadre en bois avant pose châssis dans le mur
Cornière métallique - fin fixation	0	0	0	0	105	0	2	AA - ouvriers	3 tire-fonds sur les 4 dans chaque montant de KVH

Mesures du processus					
VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
405	591	591	[min]	69%	[%]

Résumé							
Numéro processus	Processus	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
1	Table 1	227	330	330	[min]	69%	[%]
2	Table 2	67	279	279	[min]	24%	[%]
3	Table 3	199	279	279	[min]	71%	[%]
4	Table magasin	43	114	114	[min]	38%	[%]
5	Stock	0	477	477	[min]	0%	[%]
	Magasin	405	591	591	[min]	69%	[%]
	Total	941	2070	591	[min]	45%	[%]

Elément	Plancher								
Quantité	2 pièces								
Processus 1	Tréteaux								
			Début		Fin				
Sous-processus	h	m	h	m	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Préparation des solives	8	40	11	5	130	0	2	AA - ouvriers	Fixation listel inf. + chainage + forage pour tube acier manutention ; pause 9h00 à 9h15
Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus						
Temps		Unité	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité	
185		[min]	130	130	130	[min]	100%	[%]	

Elément	Plancher									
Quantité	2 pièces									
Processus 2	Table 1	Face inférieure								
			Début		Fin					
Sous-processus	h	m	h	m	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques	
Disposition structure	11	15	12	53	68	6	2	AA - ouvriers	Pause 12h00 à 12h30	
Agrafage structure	12	59	14	5	66	12	2	AA - ouvriers		
Pose 1er OSB	14	17	14	50	33	18	2	AA - ouvriers	Fin de journée 15h00	
Fixation 1er OSB	7	58	8	40	42	5	1	AA - opérateur	Début journée 7h50	
Découpe 1er OSB	8	45	9	40	40	20	1	AA - opérateur	Pause 9h00 à 9h15	
Pose 2ème OSB	10	0	10	25	25	2	2	AA - ouvriers		
Fixation 2ème OSB	10	27	10	51	24	4	1	AA - opérateur		
Découpe 2ème OSB	10	55	11	19	24	51	1	AA - opérateur		
Retournement	12	40	12	45	5	0	2	AA - ouvriers	Barres acier pour fixer planchers ; Pause 12h00 à 12h30	
Mesures du processus										
VC/T	L/T	C/T	Unité		(VC/T)/(L/T)	Unité				
322	445	445	[min]		72%	[%]				

Elément	Plancher									
Quantité	2 pièces									
Processus 3	Table 2									
	Début		Fin							
Sous-processus	h	m	h	m	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques	
Stock avant processus	12	45	13	0	15	0				
Copeaux de bois	13	0	14	0	60	15	1	AA - ouvrier		
Sable	14	15	15	20	50	5	2	AA - ouvriers	Pause 15h00 à 15h15	
Multiplex	15	25	16	20	55	15	2	AA - ouvriers	Pose et agrafage ; fin de journée 16h30	
Isolant	7	40	8	45	65	15	2	AA - ouvriers		
Stockage d'attente	0	0	0	0	40					
Passage et alignement vers axe du pont	9	0	9	20	5	0	2	AA - ouvriers	Pause 9h00 à 9h15	
Mesures du processus										
VC/T	L/T	C/T	Unité		(VC/T)/(L/T)	Unité				
230	340	340	[min]		68%	[%]				

Elément	Plancher								
Quantité	2 pièces								
Processus 4	Table 3		Face supérieure						
	Début		Fin						
Sous-processus	h	m	h	m	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Stock avant processus	9	20	9	22	2				
Contrôle	9	22	9	30	8	2	1	AA - ouvrier	Contrôle de la rectitude des montants : agrafage par le dessus si pas bon (voir schéma)
Agrafage structure					0	0			N'a lieu que si le contrôle est négatif
Pose OSB	9	32	10	25	53	70	2	AA - ouvriers	
Fixation OSB	11	35	12	55	50	5	1	AA - opérateur	Pause 12h00 à 12h30
Découpe OSB	13	0	13	42	42	104	1	AA - opérateur	
Passage sur table magasin	15	26	15	30	4	0	2	AA - ouvriers	Pause 15h00 à 15h15
Mesures du processus									
VC/T	L/T	C/T	Unité		(VC/T)/(L/T)	Unité			
153	340	340	[min]		45%	[%]			

Elément	Plancher									
Quantité	2 pièces									
Processus 5	Transport avec pont	Face supérieure								
	Début		Fin		Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques	
Sous-processus	h	m	h	m						
Stock avant processus	15	30	15	52	22	0				
Stockage dans le fond du hall	15	52	16	22	30	0	1	AA - ouvrier		
Mesures du processus										
VC/T	L/T	C/T	Unité		(VC/T)/(L/T)	Unité				
0	52	52	[min]		0%	[%]				

Résumé							
Numéro processus	Processus	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
1	Tréteaux	130	130	130	[min]	100%	[%]
	Stock	0	185	185	[min]	0%	[%]
2	Table 1	322	445	445	[min]	72%	[%]
3	Table 2	230	340	340	[min]	68%	[%]
4	Table 3	153	340	340	[min]	45%	[%]
5	Transport avec pont	0	52	52	[min]	0%	[%]
	Total	835	1492	445	[min]	56%	[%]

Elément	Terrain		Option dalle sur sol						
Quantité	1 pièce								
Processus 1	Terrassement								
	Début		Fin						
Sous-processus	h	m	h	m	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Fond de coffre	0	0	0	0	1368	0	2	Maçons (WUST)	Mesurage, pose chaise, terrassement, fond de coffre
	Stockage entre les 2 processus		Mesures du processus						
	Temps	Unité	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité	
	0	[min]	1368	1368	1368	[min]	100%	[%]	

Elément	Terrain									
Quantité	1 pièce									
Processus 2	Réseau égouttage									
			Début		Fin					
Sous-processus	h	m	h	m	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques	
Egoutage et empierrement	0	0	0	0	1368	0	4	Maçons (WUST)	Géotextile, égoutage, empierrement, sable, visqueen	
Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus							
Temps		Unité	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité		
0		[min]	1368	1368	1368	[min]	100%	[%]		

Elément	Terrain								
Quantité	1 pièce								
Processus 3	Dalle								
	Début		Fin						
Sous-processus	h	m	h	m	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Armature + béton	0	0	0	0	912	0	4	Maçons (WUST)	Armature, béton, remblais
	Stockage entre les 2 processus		Mesures du processus						
	Temps	Unité	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité	
	4560	[min]	912	912	912	[min]	100%	[%]	

Elément	Chantier								
Quantité	1 pièce								
Processus 4	Préparation montage								
	Début		Fin						
Sous-processus	h	m	h	m	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Monter la grue	7	10	7	25	15	5	1	Havart	
Niveaux des sablières	7	30	7	34	4	0	1	Abraham	
			Mesures du processus						
	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité			
	0	24	24	[min]	0%	[%]			

Résumé							
Numéro processus	Processus	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
1	Terrassement	1368	1368	1368	[min]	100%	[%]
	Stock	0	0	0	[min]	#DIV/0!	[%]
2	Réseau égouttage	1368	1368	1368	[min]	100%	[%]
	Stock	0	0	0	[min]	#DIV/0!	[%]
3	Dalle	912	912	912	[min]	100%	[%]
	Stock	0	4560	4560	[min]	0%	[%]
4	Préparation montage	0	24	24	[min]	0%	[%]
	Total	3648	8232	4560	[min]	44%	[%]

Elément	Mur								
Quantité	1 pièce								
Processus 1	Chargement sur camion								
	Début		Fin						
Sous-processus	h	m	h	m	Durées (')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Sortie des magasins	11	35	11	37	2	0	2	AA	
Placement sur la table levante	11	37	11	38	1	0	2	AA	
Abaissement table	11	38	11	39	1	0	2	AA	
Fixation élingues et sangles pont	11	39	11	41	2	0	2	AA	4 élingues par mur
Levage table et suspension avec le pont roulant	11	41	11	43	2	0	2	AA	
Transport jusque remorque	11	43	11	46	3	0	2	AA	Distance environ 80 m.
Positionnement sur la remorque	11	46	11	52	6	0	2	AA	
Sanglage	11	52	11	54	2	0	1	Havart	
Stockage entre les 2 processus					Mesures du processus				
Temps		Unité	VC/T		L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
26		[min]	0		18	18	[min]	0%	[%]

Elément	Plancher								
Quantité	1 pièce								
Processus 1'	Chargement sur camion								
	Début		Fin						
Sous-processus	h	m	h	m	Durées (')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Fixation élingues et sangles pont	14	27	14	29	2	0	2	AA	
Suspension avec le pont roulant	14	29	14	31	2	0	2	AA	
Transport jusque remorque	14	31	14	34	3	0	2	AA	Distance environ 80 m.
Positionnement sur la remorque	14	34	14	37	3	0	2	AA	
Retrait élingues	14	37	14	39	2	0	2	AA	
Retour pont dans le fond du hall	14	39	14	42	3	0	2	AA	
Stockage entre les 2 processus					Mesures du processus				
Temps		Unité	VC/T		L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
26		[min]	0		15	15	[min]	0%	[%]

Elément	Remorque								
Quantité	1 pièce								
Processus 2	Transport								
	Début		Fin						
Sous-processus	h	m	h	m	Durées (')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Sortie garage	0	0	0	0	5	0	1	Havart	
Trajet (aller)	0	0	0	0	50	0	1	Havart	f(distance)
Stationnement et arrêt camion	0	0	0	0	5	0	1	Havart	
Mesures du processus									
VC/T	L/T	C/T		Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité			
0	60	60		[min]	0%	[%]			

Résumé							
Numéro processus	Processus	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
1	Chargement (1 élément)	0	17	17	[min]	0%	[%]
	Chargement (6 éléments)	0	94	94	[min]	0%	[%]
	Stock	0	26	26	[min]	0%	[%]
2	Transport	0	60	120	[min]	0%	[%]
	Total (5 remorques)	0	634	120	[min]	0%	[%]

Capacité remorque			Temps de chargement											
Eléments pour les bureaux			Nombre	Unité	Element			Nombre	Unité	Temps unitaire	Unité	Temps total	Unité	
Murs			6	[pièce]	Murs			6	[pièce]	18	[min]	108	[min]	
Planchers			6	[pièce]	Planchers			6	[pièce]	15	[min]	90	[min]	
Murs			6	[pièce]	Murs			6	[pièce]	18	[min]	108	[min]	
Toitures			6	[pièce]	Toitures			6	[pièce]	15	[min]	90	[min]	
Acrotères			4	[pièce]	Acrotères			4	[pièce]	18	[min]	72	[min]	
Nombre total éléments			28	[pièce]	Total								468	[min]
Nombre de remorques			5	[pièce]	Moyenne								93,6	[min/remorque]
												16,71428571	[min/élément]	

Elément	Mur							
Quantité	6 pièces							
Processus 1	Préparation pose							
Sous-processus	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques			
Placement joint compressible sur "sablière" (VR)	18	2	1	Abraham	Dès que les tous les planchers sont mis ou que la dalle de sol est prête			
Placement joint compressible sur "sablière" (VN)	18	2	1	Abraham				
Placement barres acier sur sablière	2	0	1	Abraham	Placement dans rainure en demi-lune dans sablière			
(VR) (VN)	Stockage entre les 2		Mesures du processus					
	Temps	Unité	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
	5	[min]	20	22	22	[min]	91%	[%]
	5	[min]	20	22	22	[min]	91%	[%]

Elément	Mur							
Quantité	1 pièce							
Processus 2	Manutention							
Sous-processus	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques			
Fixation des élingues en acier (VR)	5	16	2	Abraham	4 élingues à fixer (20"/élingue)			
Fixation des élingues en acier (VN)	2	7	2	Abraham				
Chaînes grue et levage (VR)	3	0	2	Havart - Grutier 1 + Abraham 1				
Chaînes grue et levage (VN)	2	0	2	Havart - Grutier 1 + Abraham 1				
Déplacement flèche grue (VR)	2	0	1	Havart - Grutier	Conditions climatiques : soleil, visibilité 100%, vent			
Déplacement flèche grue (VN)	2	0	1	Havart - Grutier				
Positionnement (VR)	4	0	5	Havart - Grutier 1 + Abraham 4	Abaissement élément et retrait des sangles grue.			
Positionnement (VN)	2	0	5	Havart - Grutier 1 + Abraham 4				
Ajustement (VR)	15	0	5	Havart - Grutier + Abraham 4	Contreventement temporaire : 2 étaçons obliques. 1 tire-fond dans le plancher/étaçon, 1 sert-joint au dessus de la cornière /étaçon + Mise de niveau avec ajustement des étaçons			
Ajustement (VN)	5	0	5	Havart - Grutier + Abraham 4				
(VR) (VN)	Stockage entre les 2		Mesures du processus					
	Temps	Unité	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
	8	[min]	19	45	24	[min]	42%	[%]
	6	[min]	7	20	11	[min]	35%	[%]

Elément	Mur																												
Quantité	1 pièce																												
Processus 3	Fixation																												
Sous-processus	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques																								
Fixation base mur (VR)	18	0	1	Abraham	RDC : 7 équerres : Delta = 120 cm ; uniquement 4 murs fixés en base																								
Fixation base mur (VN)	15	0	1	Abraham	Niv+1 : Vis : 380/8mm dans chaque trou préforé dans les murs ; 8 vis/mur, 1'/vis ; Delta = 100 à 150 cm																								
(VR) (VN)	<table><tr><th colspan="6">Mesures du processus</th></tr><tr><th>VC/T</th><th>L/T</th><th>C/T</th><th>Unité</th><th>(VC/T)/(L/T)</th><th>Unité</th></tr><tr><td>18</td><td>18</td><td>18</td><td>[min]</td><td>100%</td><td>[%]</td></tr><tr><td>15</td><td>15</td><td>15</td><td>[min]</td><td>100%</td><td>[%]</td></tr></table>					Mesures du processus						VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité	18	18	18	[min]	100%	[%]	15	15	15	[min]	100%	[%]
	Mesures du processus																												
	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité																							
	18	18	18	[min]	100%	[%]																							
	15	15	15	[min]	100%	[%]																							

Résumé										
Numéro processus	Processus	VC/T		L/T		C/T		Unité	(VC/T)/(L/T)	
		VR	VN	VR	VN	VR	VN		VR	VN
1	Préparation pose	20	20	22	22	22	22	[min]	91%	91%
	Stock	0	0	5	5	5	5	[min]	0%	0%
2	Manutention	19	7	45	20	24	11	[min]	42%	35%
	Stock	0	0	8	6	8	6	[min]	0%	0%
3	Fixation	18	15	18	15	18	15	[min]	100%	100%
	Total (1 mur)	57	42	98	68	24	15	[min]	58%	62%
	Total (6 murs)	134	110	218	143	218	143	[min]	61%	77%

Elément	Plancher				
Quantité	1 pièce				
Processus 1	Manutention				
Sous-processus	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Fixation des élingues (VR)	2	5	2	AA	20"/fixation élingue; 4 élingues/plancher
Fixation des élingues (VN)	2	2	2	AA	20"/fixation élingue; 4 élingues/plancher
Chaînes grue et levage (VR)	1	0	3	Havart - Grutier 1; AA 2	
Chaînes grue et levage (VN)	1	0	3	Havart - Grutier 1; AA 2	
Déplacement flèche grue (VR)	2	0	1	Havart - Grutier 1	
Déplacement flèche grue (VN)	2	0	1	Havart - Grutier 1	
Abaissement élément (VR)	6	0	4	Havart - Grutier 1; Abraham 3	
Abaissement élément (VN)	2	0	4	Havart - Grutier 1; Abraham 3	
(VR)	Stockage entre les 2 processus		Mesures du processus		
	Temps	Unité	VC/T	L/T	C/T
	6	[min]	6	16	9
			Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
(VN)	2	[min]			
			[min]	38%	[%]
			2	9	5
				[min]	22%
					[%]

Elément	Plancher				
Quantité	6 pièces				
Processus 2	Placement isolant				
Sous-processus	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Placement isolant (VR)	18	0	3	AA - Abraham	Entre planchers et murs
Placement isolant (VN)	9	0	3	AA - Abraham	Entre planchers et murs
(VR)	Stockage entre les 2 processus		Mesures du processus		
	Temps	Unité	VC/T	L/T	C/T
	2	[min]	18	18	18
	2	[min]	9	9	9
(VN)	Stockage entre les 2 processus		Mesures du processus		
	Temps	Unité	VC/T	L/T	C/T
	2	[min]	18	18	18
	2	[min]	9	9	9

Elément	Plancher				
Quantité	6 pièces				
Processus 3	Placement étançons				
Sous-processus	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Placement étançons (VR)	5	0	2	AA	Dès que tous les planchers sont mis
Placement étançons (VN)	5	0	2	AA	Dès que tous les planchers sont mis
(VR)	Stockage entre les 2 processus		Mesures du processus		
	Temps	Unité	VC/T	L/T	C/T
	3	[min]	0	5	5
	3	[min]	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
			[min]	0%	[%]
(VN)			0	5	5
			[min]	0%	[%]

Elément	Plancher				
Quantité	6 pièces				
Processus 4	Fixation inter-planchers				
Sous-processus	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Fixation inter-planchers (VR)	36	0	2	AA	Tire-fond : 3 * 160/12mm dans chaque trappe : 1 tire-fond = 1', 4 trappes/plancher
Fixation inter-planchers (VN)	36	0	2	AA	6 minutes par plancher
(VR)	Stockage entre les 2 processus		Mesures du processus		
	Temps	Unité	VC/T	L/T	C/T
	25	[min]	36	36	36
(VN)	25	[min]	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
			[min]	100%	[%]
			36	36	36
			[min]	100%	[%]

Elément	Plancher				
Quantité	6 pièces				
Processus 5	Fixation avec cornière				
Sous-processus	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Fixation avec cornière (VR)	18	0	1	Abraham	Vis : 50/4mm dans chaque trou préforé dans la cornière murale : 1 vis = 10" ; 8 vis/plancher tous les 25cm sur pignon => 14,5 vis en moyenne/plancher
Fixation avec cornière (VN)	18	0	1	Abraham	Vis : 50/4mm dans chaque trou préforé dans la cornière murale : 1 vis = 10" ; 8 vis/plancher tous les 25cm sur pignon => 14,5 vis en moyenne/plancher
(VR)	Mesures du processus				
	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)
	18	18	18	[min]	100%
(VN)	18	18	18	[min]	100%

Résumé										
Numéro processus	Processus	VC/T		L/T		C/T		Unité	(VC/T)/(L/T)	
		VR	VN	VR	VN	VR	VN		VR	VN
1	Manutention	6	2	16	9	9	5	[min]	38%	22%
	Stock	0	0	6	2	6	2	[min]	0%	0%
2	Placement isolant	18	9	18	9	18	9	[min]	100%	100%
	Stock	0	0	2	2	2	2	[min]	0%	0%
3	Placement étançons	0	0	5	5	5	5	[min]	0%	0%
	Stock	0	0	3	3	3	3	[min]	0%	0%
4	Fixation inter-planchers	36	36	36	36	36	36	[min]	100%	100%
	Stock	0	0	25	25	25	25	[min]	0%	0%
5	Fixation avec cornière	18	18	18	18	18	18	[min]	100%	100%
	Total (6 planchers)	108	75	174	134	174	134	[min]	62%	56%

Elément	Acrotère							
Quantité	4 pièces							
Processus 1	Préparation pose							
Sous-processus	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques			
Placement joint compressible sur "sablère" (VR) et (VN)	20	3	1	Abraham	Dès que les tous les planchers sont mis ou que la dalle de sol est prête			
Placement barres acier sur sablière	2	0	1	Abraham	Placement dans rainure en demi-lune dans sablière			
(VR) (VN)	Stockage entre les 2		Mesures du processus					
	Temps	Unité	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
	0	[min]	22	25	25	[min]	88%	[%]
	0	[min]	22	25	25	[min]	88%	[%]

Elément	Acrotère							
Quantité	1 pièce							
Processus 2	Manutention							
Sous-processus	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques			
Fixation des élingues en acier (VR)	2	2	2	Abraham	4 élingues à fixer (20"/élingue)			
Fixation des élingues en acier (VN)	2	2	2	Abraham				
Chaînes grue et levage (VR)	1	0	2	Havart - Grutier 1 + Abraham 1				
Chaînes grue et levage (VN)	1	0	2	Havart - Grutier 1 + Abraham 1				
Déplacement flèche grue (VR)	1	0	1	Havart - Grutier	Conditions climatiques : soleil, visibilité 100%, vent			
Déplacement flèche grue (VN)	1	0	1	Havart - Grutier				
Positionnement (VR)	1	0	5	Havart - Grutier 1 + Abraham 4	Abaissement élément et retrait des sangles grue.			
Positionnement (VN)	1	0	5	Havart - Grutier 1 + Abraham 4				
Ajustement (VR)	5	0	5	Havart - Grutier 1 + Abraham 4	Contreventement temporaire : 2 étaçons obliques. 1 tire-fond dans le plancher/étaçon, 1 sert-joint au dessus de la cornière /étaçon + Mise de niveau avec ajustement des étaçons			
Ajustement (VN)	2	0	5	Havart - Grutier 1 + Abraham 4				
(VR) (VN)	Stockage entre les 2		Mesures du processus					
	Temps	Unité	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
	5	[min]	6	12	7	[min]	50%	[%]
	5	[min]	3	9	4	[min]	33%	[%]

Elément	Acrotère					
Quantité	1 pièce					
Processus 3	Fixation					
Sous-processus	Durée(')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques	
Fixation entre acrotère et mur niv+1 (VR)	8	0	1	Abraham	Vis : 380/8mm dans chaque trou préforé dans les murs ; 8 vis/mur. 1'/vis ; Delta = 100 à 150 cm	
Fixation entre acrotère et mur niv+1 (VN)	8	0	1	Abraham		
(VR) (VN)	Mesures du processus					
	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
	8	8	8	[min]	100%	[%]
	8	8	8	[min]	100%	[%]

Résumé										
Numéro processus	Processus	VC/T		L/T		C/T		Unité	(VC/T)/(L/T)	
		VR	VN	VR	VN	VR	VN		VR	VN
1	Préparation pose	22	22	25	25	25	25	[min]	88%	88%
	Stock	0	0	0	0	0	0	[min]	0%	0%
2	Manutention	6	3	12	9	7	4	[min]	50%	33%
	Stock	0	0	5	5	5	5	[min]	0%	0%
3	Fixation	8	8	8	8	8	8	[min]	100%	100%
	Total (1 acrotère)	36	33	50	47	8	8	[min]	72%	70%
	Total (4 acrotères)	54	54	74	71	74	71	[min]	73%	76%

Elément	Bâtiment							
Quantité	1 pièce							
Processus 1	Revêtement de toiture							
Sous-processus	Début	Fin	Durée (j)	Durée (')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Revêtement toiture	25/03/2013	26/03/2013	2	912	0	2 - 4	Couvreur (Michael)	
Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus					
Temps			Unité		VC/T	L/T	C/T	Unité
5472			[min]		912	912	912	Unité
								100%
								[%]

Elément	Bâtiment							
Quantité	1 pièce							
Processus 2	Ventilation							
Sous-processus	Début	Fin	Durée (j)	Durée (')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Pose et raccordement groupe VMC + Entrée - sortie air toiture	15/04/2013	15/04/2013	1	456	0	2,5	Couvreur (Michael)	
Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus					
Temps			Unité		VC/T	L/T	C/T	Unité
0			[min]		456	456	456	Unité
								100%
								[%]

Elément	Bâtiment							
Quantité	1 pièce							
Processus 3	Bardage							
Sous-processus	Début	Fin	Durée (j)	Durée (')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Crépis	16/04/2013	2/05/2013	13	5472	0	4	Crépisseur	Rendement : 1,15 m²/(homme.heure)
			Mesures du processus					
			Unité		VC/T	L/T	C/T	Unité
					5472	5472	5472	Unité
								100%
								[%]

Résumé							
Numéro processus	Processus	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
1	Revêtement de toiture	912	912	912	[min]	100%	[%]
	Stock	0	5472	5472	[min]	0%	[%]
2	Ventilation	456	456	456	[min]	100%	[%]
	Stock	0	0	0	[min]	#DIV/0!	[%]
3	Bardage	5472	5472	5472	[min]	100%	[%]
	Total	6840	12312	5472	[min]	56%	[%]

Elément	Niveau		Début	Fin	Durée (j)	Durée (')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
	Quantité	1 pièce								
Processus 1		RDC								
Sous-processus										
Pose des bouchons, étanchéité air, RF cornières : RF cornières RDC			25/03/2013 08:00	25/03/2013 17:00	1	456	0	2	AA - ouvriers	Protection RF des cornières supportant les planchers
Pose sanitaires : Pose conduites sanitaires décharge alimentation RDC			25/03/2013 08:00	25/03/2013 17:00	1	456	0	3	AA - ouvriers	
Ventilation : Pose des gaines sur dalle RDC			26/03/2013 08:00	26/03/2013 13:00	0,5	228	0,5	2	Kazemir	
Finitions sol : RDC isolation projetée			27/03/2013 08:00	27/03/2013 17:00	1	456	0	2	ISOTRIE	PU projeté
Pose sanitaires : Raccordement décharge et alimentation sanitaire gaine technique RDC			27/03/2013 08:00	27/03/2013 13:00	0,5	228	1,5	2	AA - ouvriers	
Finitions sol : RDC chape humide			29/03/2013 08:00	29/03/2013 13:00	0,5	228	0,5	2	Chapiste - Carreleur	
Finitions sol : RDC Carrelage			2/04/2013 08:00	3/04/2013 17:00	2	912	1	1,5	Chapiste - Carreleur	
Ventilation : Pose des gaines de ventilation RDC			5/04/2013 08:00	5/04/2013 17:00	1	456	0	3	Kazemir	
Pose des bouchons, étanchéité air, RF cornières : Bouchons Steico RDC			5/04/2013 08:00	5/04/2013 13:00	0,5	228	3,5	3	AA - ouvriers	
Enduit et peinture : Enduit plafond RDC			11/04/2013 08:00	12/04/2013 17:00	2	912	0	2	AA - ouvriers	
Pose cloisons et contre-cloisons : RDC			12/04/2013 08:00	24/04/2013 17:00	9	4104	0	2,3	AA - ouvriers	
Electricité : RDC : Câbles périphériques			12/04/2013 08:00	12/04/2013 17:00	1	456	0	2	K-Seppi	
Pose panneaux finitions cloisons : RDC			17/04/2013 08:00	30/04/2013 13:00	9,5	4332	0	2	AA - ouvriers	
Enduit et peinture : Peinture plafond RDC			25/04/2013 08:00	26/04/2013 17:00	2	912	0	1	AA - ouvriers	2 couches
Electricité : RDC : Câbles cloisons			29/04/2013 08:00	29/04/2013 17:00	1	456	7	2	K-Seppi	
Pose sanitaires : Mobiliers RDC			10/05/2013 08:00	10/05/2013 17:00	1	456	1	4	AA - ouvriers	
Electricité : finitions RDC (alarmes, parlophone, luminaires, ...)			14/05/2013 08:00	14/05/2013 17:00	1	456	0	2	K-Seppi	

Mesures du processus				
VC/T		C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)
8664		15504	[min]	56%

Elément	Niveau		Début	Fin	Durée (j)	Durée (')	Stock (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
	Quantité	1 pièce								
Processus 1		Niv+1								
Sous-processus										
Pose des bouchons, étanchéité air, RF cornières : Trappes planchers			25/03/2013 08:00	25/03/2013 13:00	0,5	228	2	2	AA - ouvriers	
Pose sanitaires : Raccordement décharge et alimentation sanitaire gaine technique Niv+1			27/03/2013 13:00	27/03/2013 17:00	0,5	228	0	3	AA - ouvriers	
Finitions sol : Pose du panneau Résilient			28/03/2013 08:00	28/03/2013 13:00	0,5	228	0,5	2	AA - ouvriers	Résilient = Panneau STEICO ép. 20 mm
Finitions sol : Pose des panneaux de chape sèche Niv+1			29/03/2013 08:00	29/03/2013 13:00	0,5	228	0,5	2	AA - ouvriers	
Pose des bouchons, étanchéité air, RF cornières : RF cornières Niv+1			2/04/2013 08:00	2/04/2013 13:00	0,5	228	1,5	2	AA - ouvriers	
Finitions sol : Pose du lino Niv+1			4/04/2013 08:00	4/04/2013 17:00	1	456	1	2	Dragas	
Pose des bouchons, étanchéité air, RF cornières : Bouchons Steico Niv+1			8/04/2013 08:00	8/04/2013 13:00	0,5	228	3,5	1,5	AA - ouvriers	
Ventilation : Pose des gaines de ventilation Niv+1			12/04/2013 08:00	12/04/2013 17:00	1	456	0	3	Kazemir	
Electricité : Niv+1 : Câbles périphériques			15/04/2013 08:00	15/04/2013 17:00	1	456	11	3	K-Seppi	
Enduit et peinture : Enduit plafond Niv+1			2/05/2013 08:00	2/05/2013 17:00	1	456	0	2	AA - ouvriers	
Enduit et peinture : Peinture plafond Niv+1			3/05/2013 08:00	6/05/2013 17:00	2	912	0	2,3	AA - ouvriers	
Pose cloisons et contre-cloisons : Niv+1			7/05/2013 08:00	10/05/2013 13:00	2,5	1140	0	2	AA - ouvriers	
Electricité : Niv+1 : Câbles cloisons			10/05/2013 08:00	10/05/2013 17:00	1	456	0	2	K-Seppi	
Pose sanitaires : Pose conduites sanitaires décharge alimentation Niv+1			10/05/2013 08:00	13/05/2013 13:00	1,5	684	0	1	AA - ouvriers	
Pose panneaux finition cloisons : Niv+1			13/05/2013 08:00	14/05/2013 17:00	2	912	0	2	AA - ouvriers	
Pose sanitaires : Mobiliers niv+1			15/05/2013 08:00	15/05/2013 17:00	1	456	0	4	AA - ouvriers	
Electricité : finitions Niv+1 (alarmes, parlophone, luminaires, ...)			16/05/2013 08:00	16/05/2013 17:00	1	456	0	2	K-Seppi	

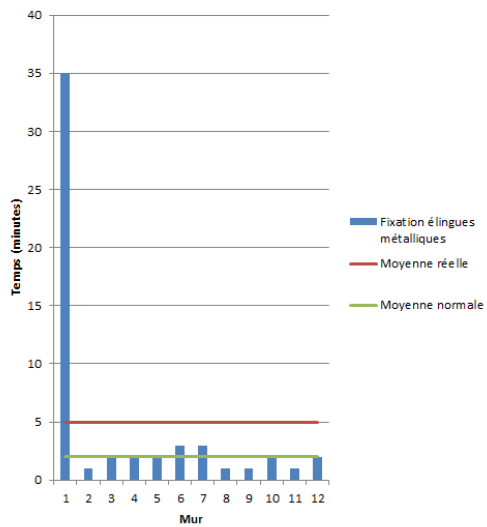
Mesures du processus				
VC/T		C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)
7296		16416	[min]	44%

Annexe C

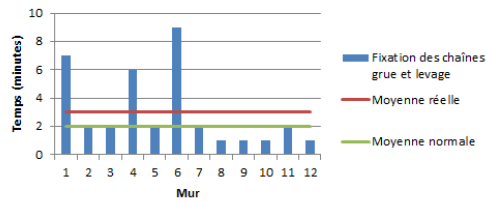
Variabilité des temps de mise en œuvre - Gros œuvre

Cette annexe reprend les temps de mise en place des différents éléments structuraux durant le montage des bureaux de l'Atelier de l'Avenir et ont pour objectif de montrer la variabilité des C/T des processus de mise en œuvre. On peut remarquer que les derniers éléments sont souvent les plus délicats à placer.

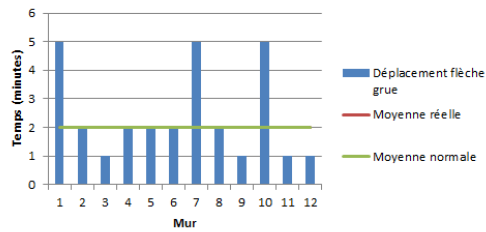
Fixation des élingues métalliques



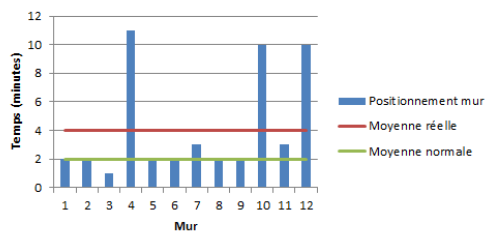
Fixation des chaînes de manutention et levage



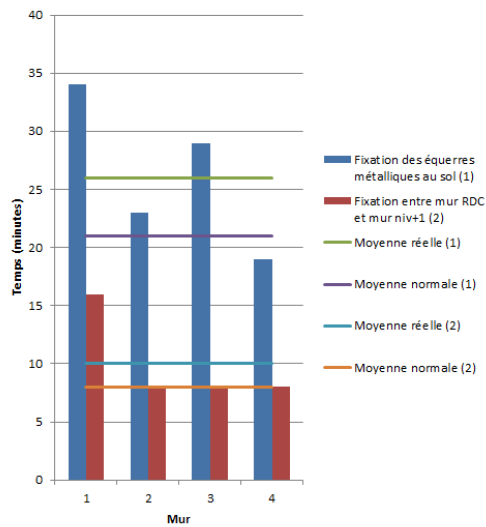
Déplacement flèche grue



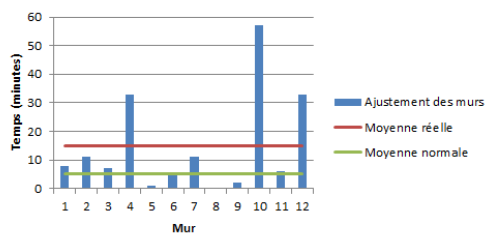
Positionnement mur



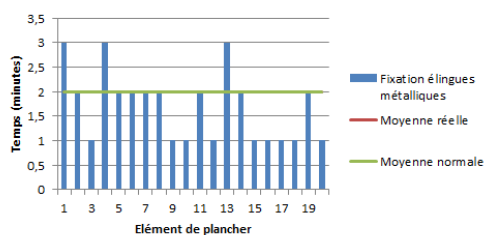
Fixation des murs en base



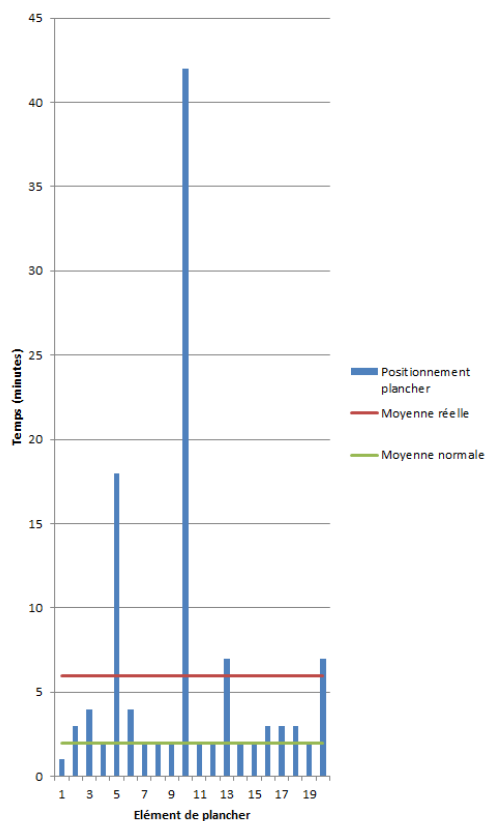
Ajustement mur



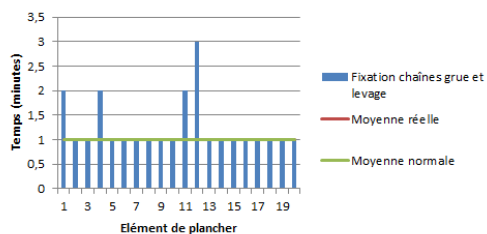
Fixation des élingues métalliques



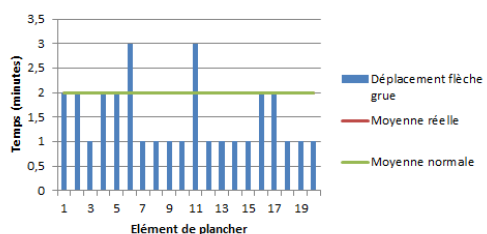
Abaissement élément



Fixation chaînes et levage



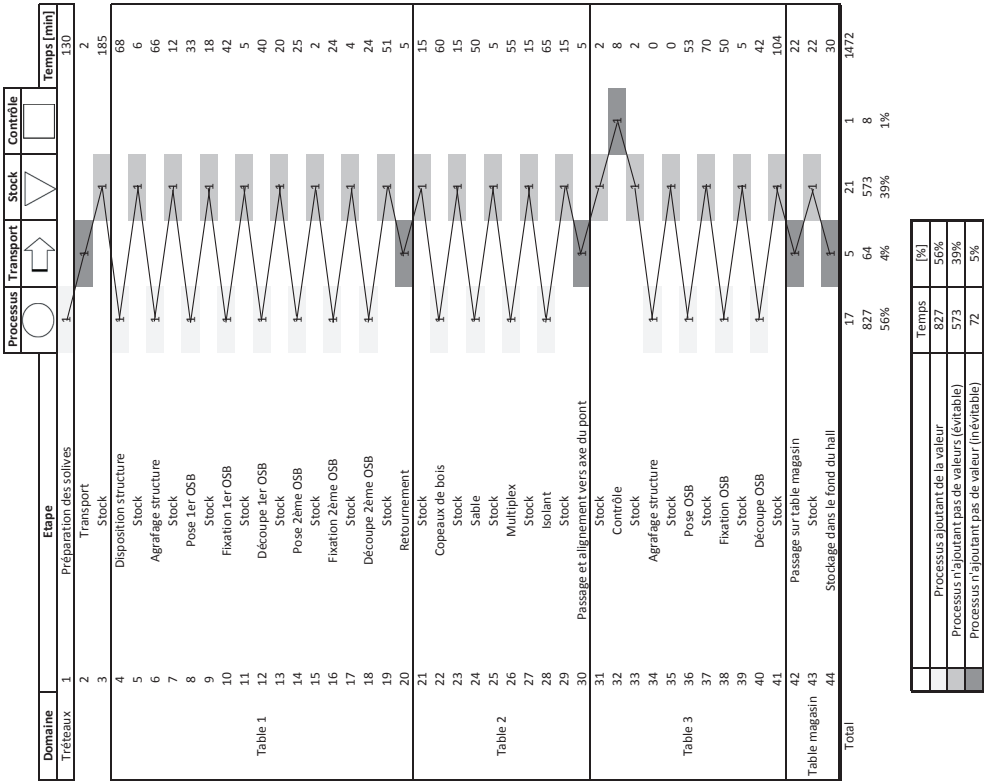
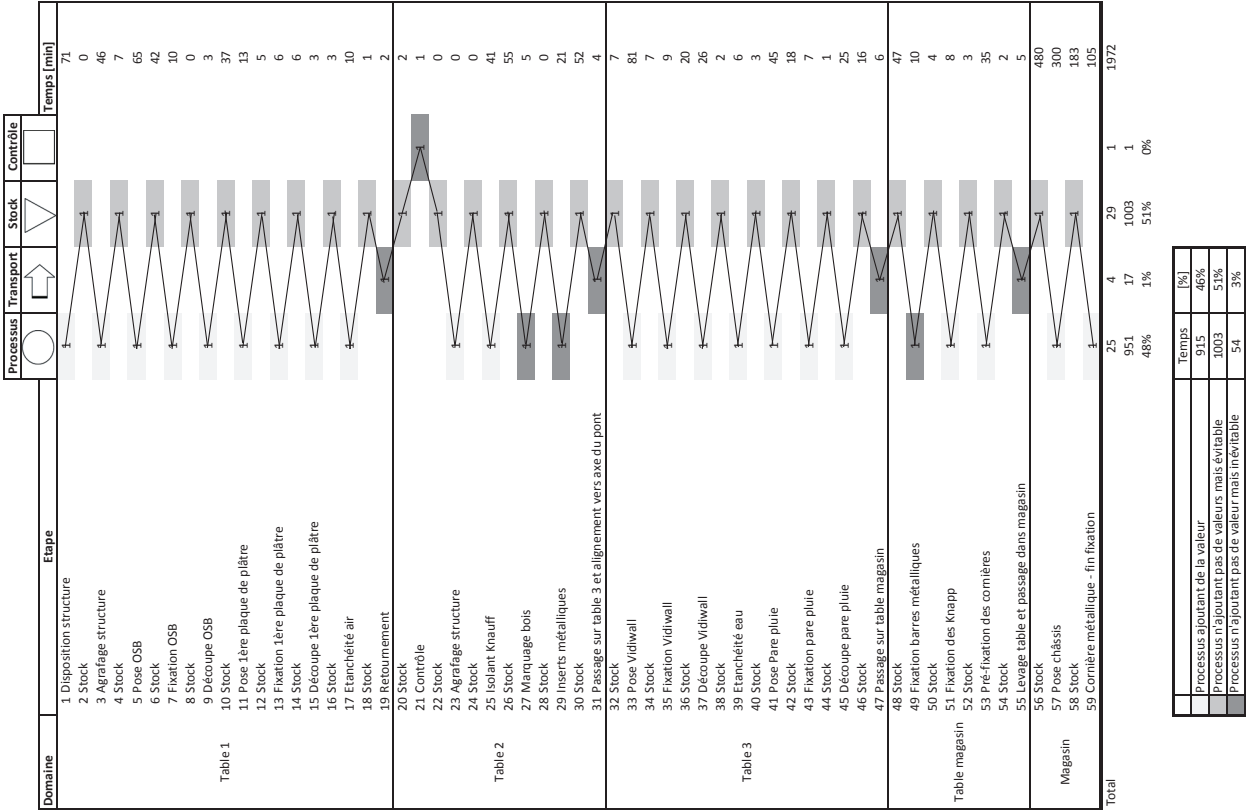
Déplacement flèche grue

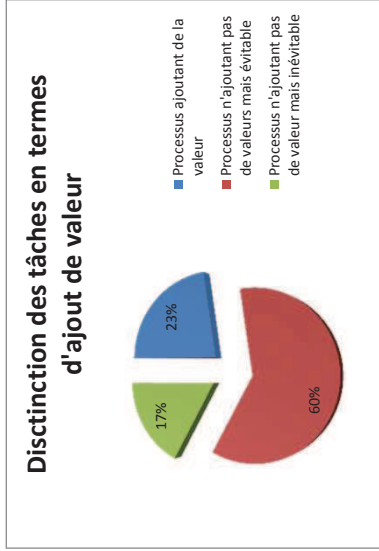
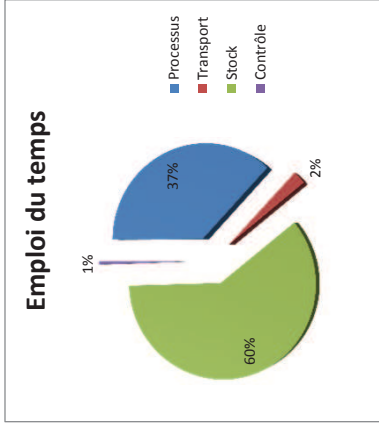
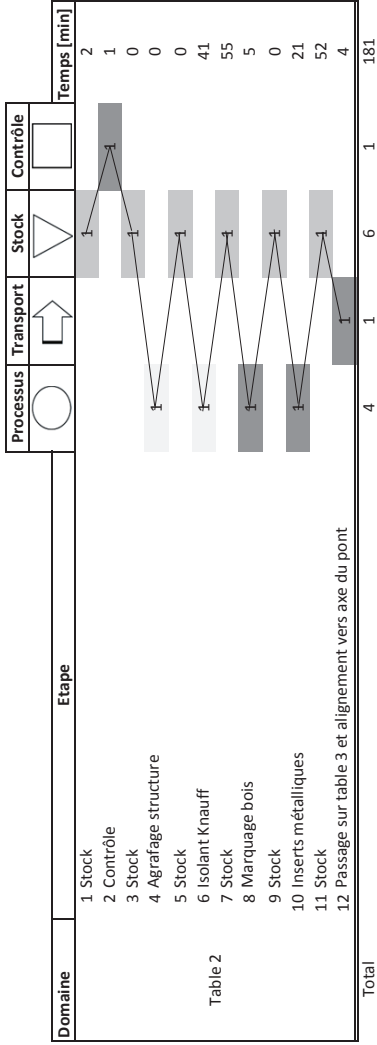
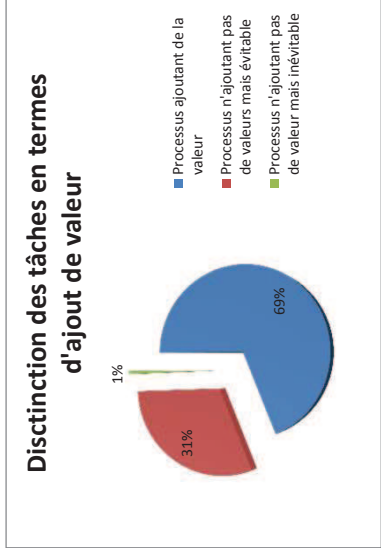
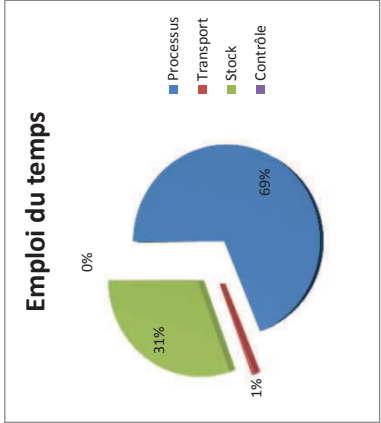
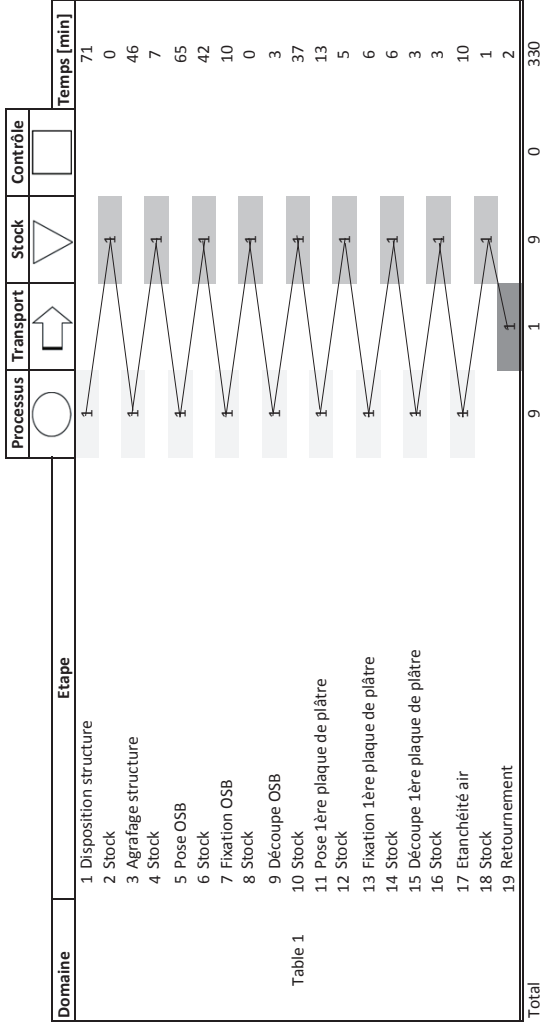


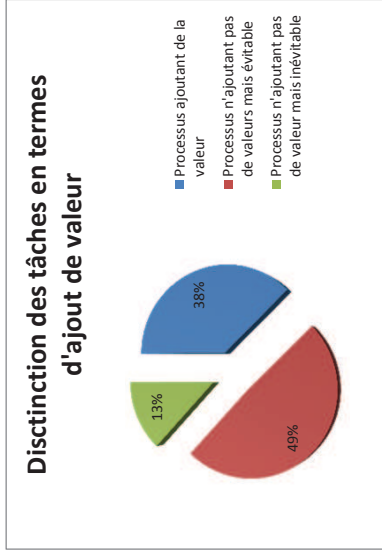
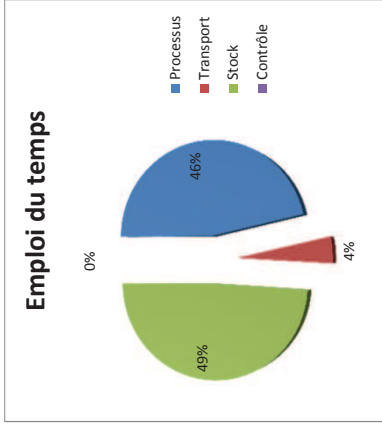
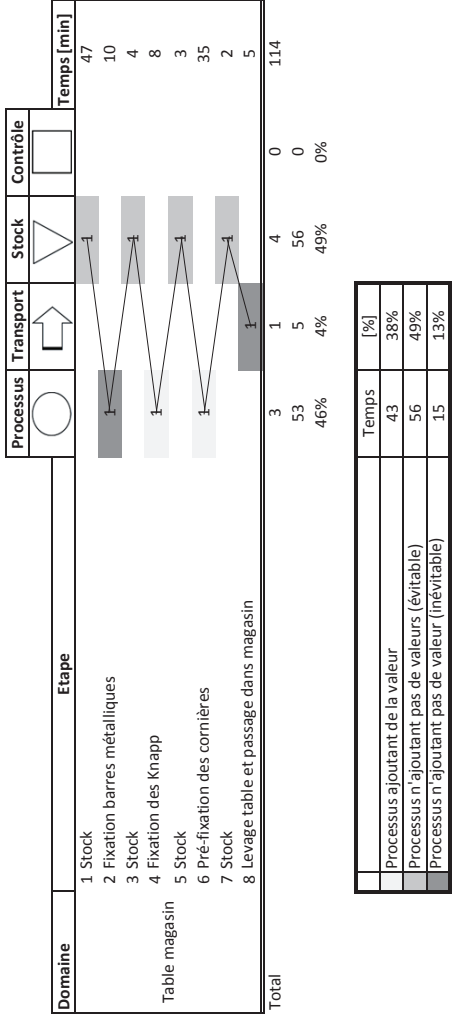
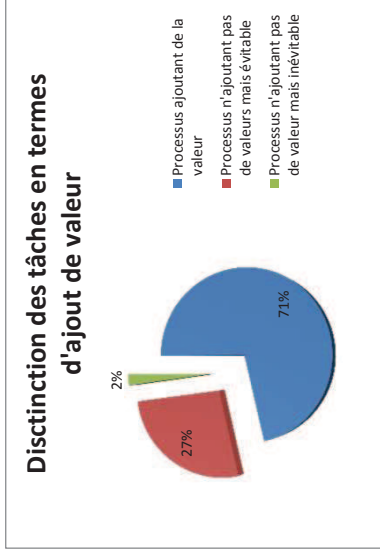
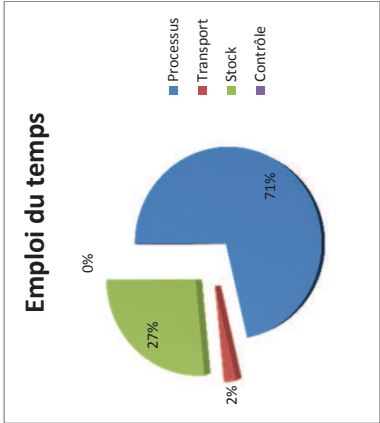
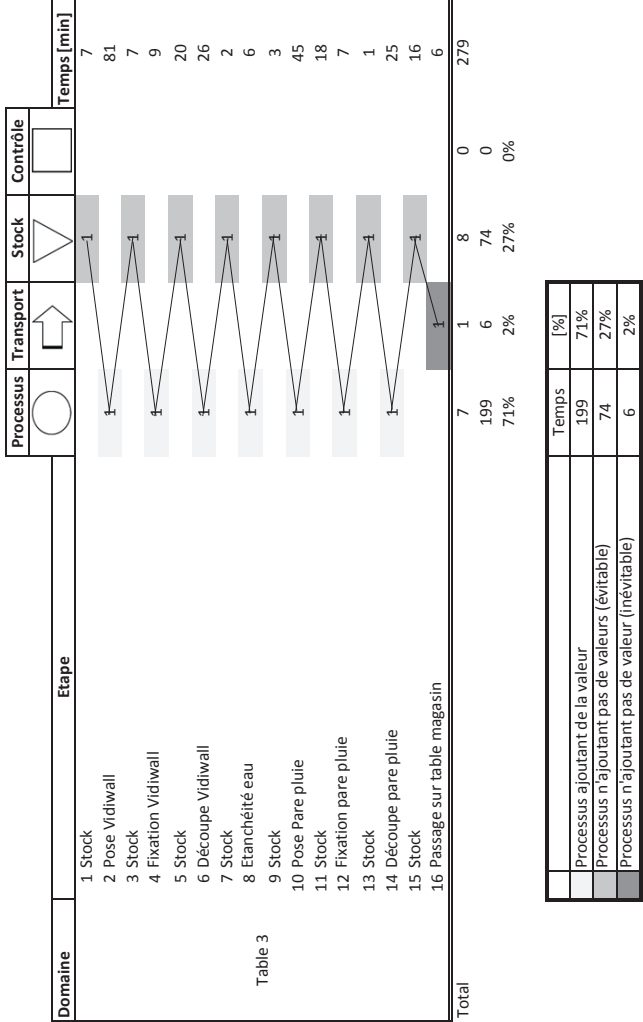
Annexe D

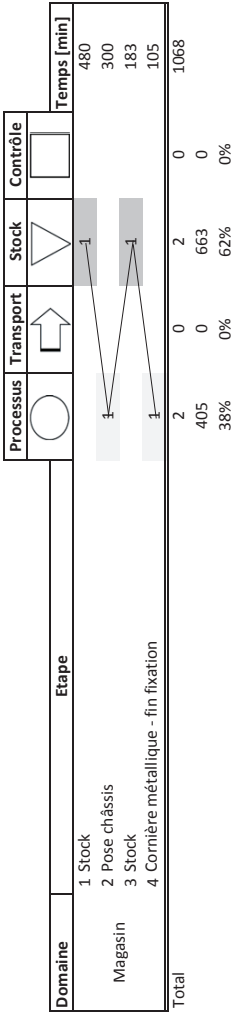
Flow Process Chart

Cette annexe reprend les *flow process chart* de l'assemblage général des planchers et des murs CIMEDE ainsi que les *flow process chart* de chaque processus d'assemblage. Le *flow process chart* du montage sur site de la structure d'une maison type est également illustré. L'intérêt de ces représentations est de mettre en évidence les sources de non-crédation de valeur tout au long de la production des produits CIMEDE.

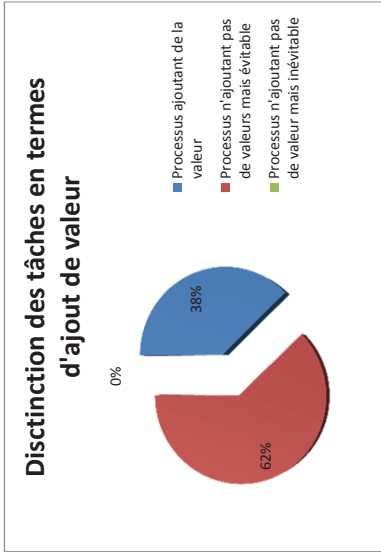
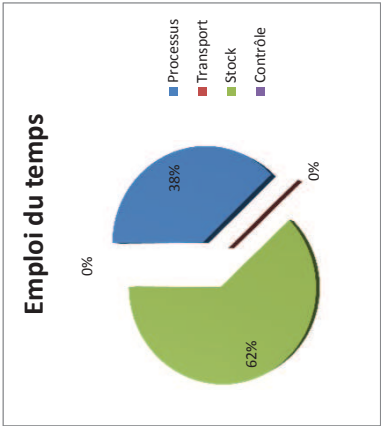


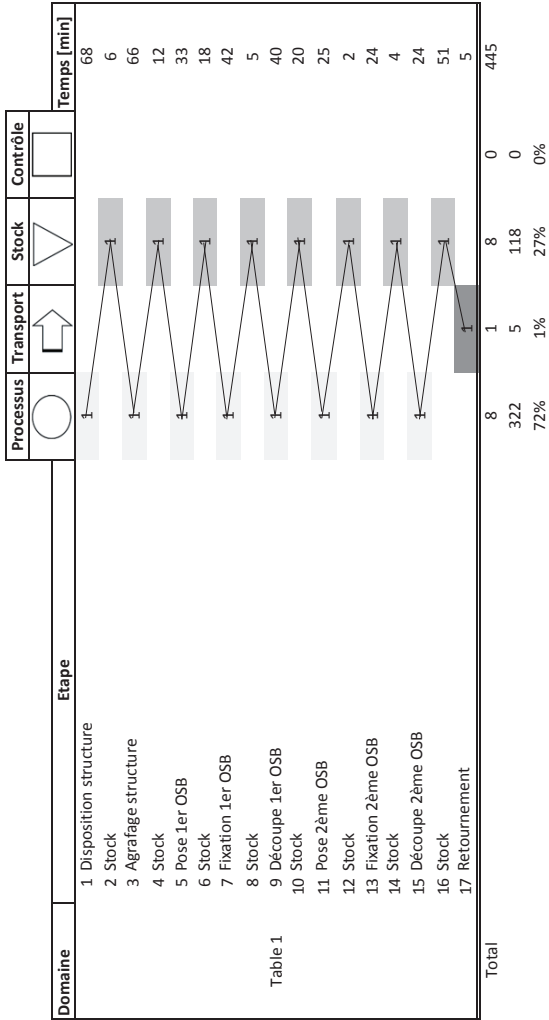




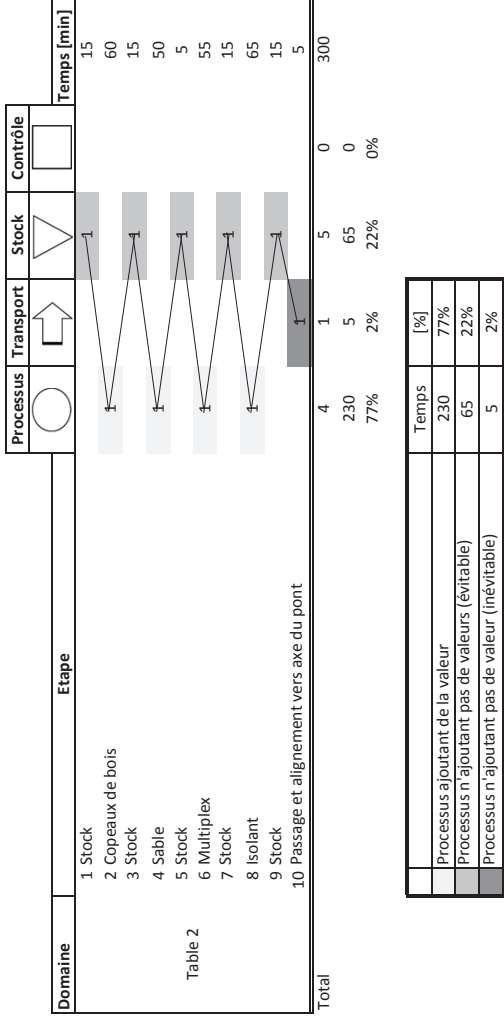
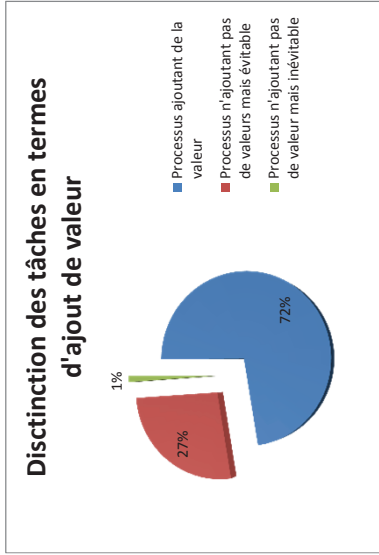
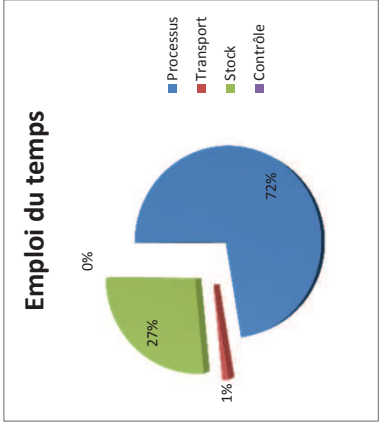


	Temps	[%]
Processus ajoutant de la valeur	405	38%
Processus n'ajoutant pas de valeurs (évitable)	663	62%
Processus n'ajoutant pas de valeur (inévitables)	0	0%

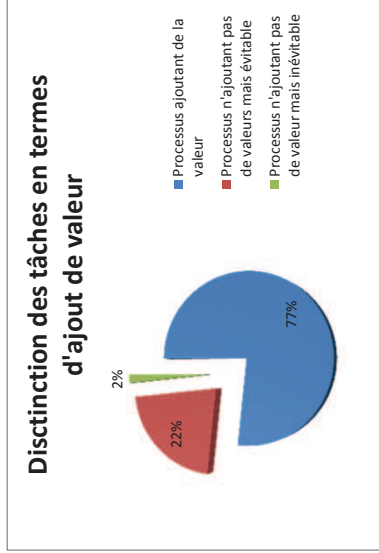
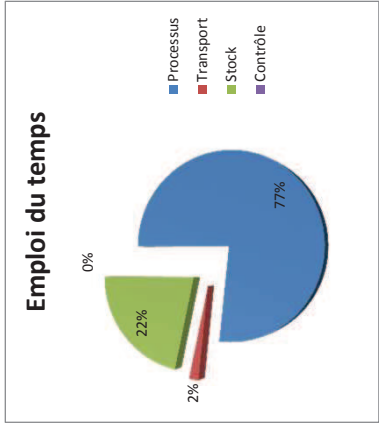


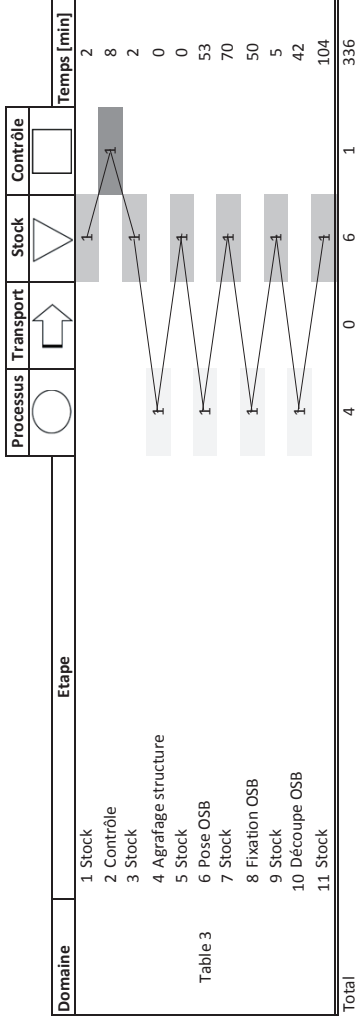


	Temps	[%]
Processus ajoutant de la valeur	322	72%
Processus n'ajoutant pas de valeurs (évitable)	118	27%
Processus n'ajoutant pas de valeur (inévitable)	5	1%

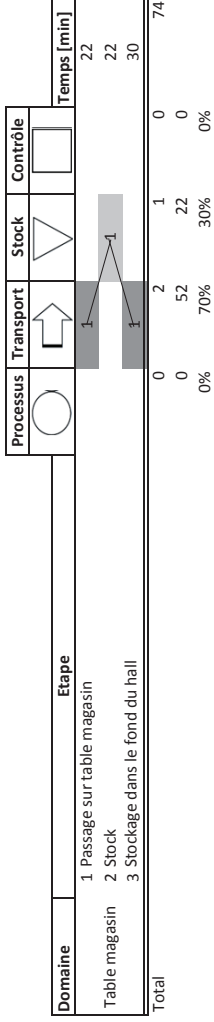
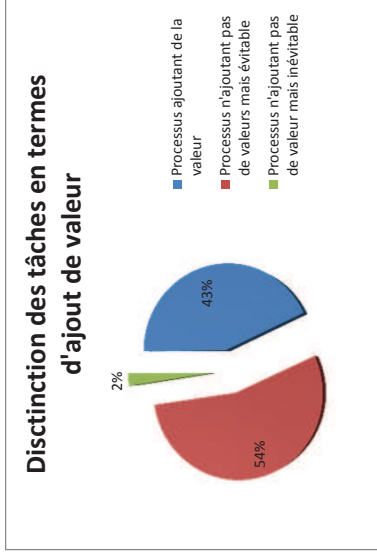
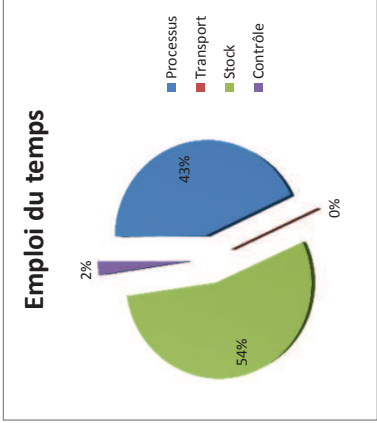


	Temps	[%]
Processus ajoutant de la valeur	230	77%
Processus n'ajoutant pas de valeurs (évitable)	65	22%
Processus n'ajoutant pas de valeur (inévitable)	5	2%

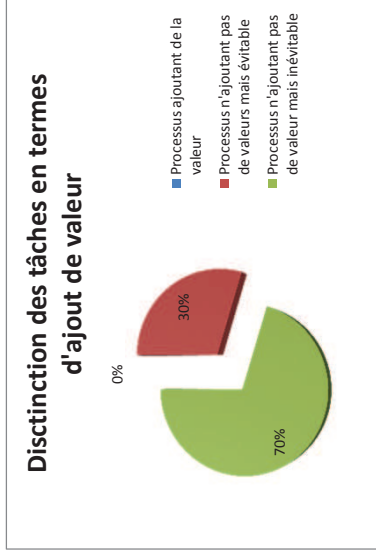
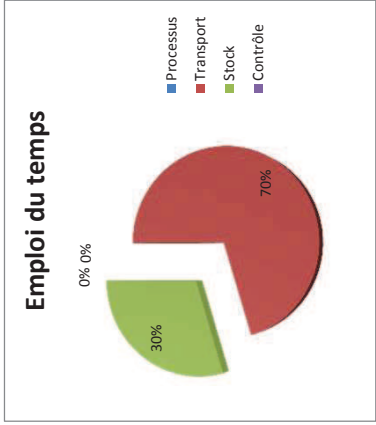


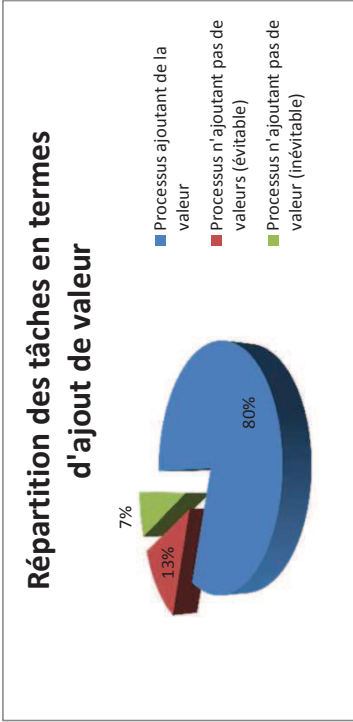
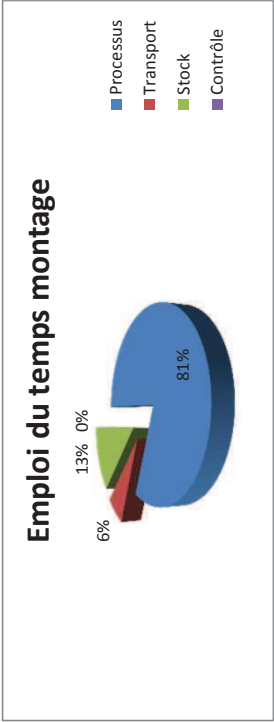
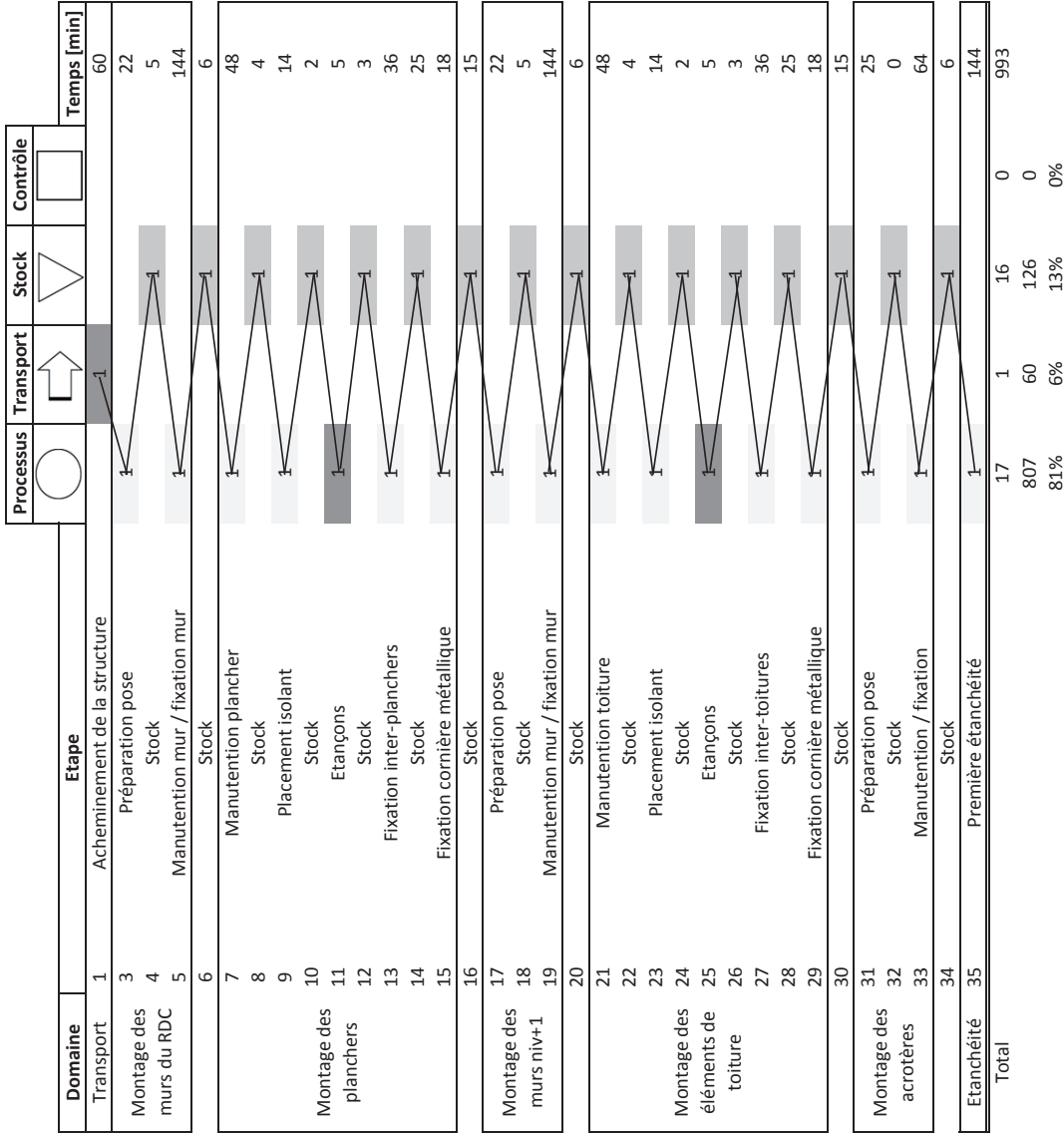


	Temps	[%]
Processus ajoutant de la valeur	145	43%
Processus n'ajoutant pas de valeurs (évitable)	183	54%
Processus n'ajoutant pas de valeur (inévitable)	8	2%



	Temps	[%]
Processus ajoutant de la valeur	0	0%
Processus n'ajoutant pas de valeurs (évitable)	22	30%
Processus n'ajoutant pas de valeur (inévitabile)	52	70%





	Temps	[%]
	797	80%
	126	13%
	70	7%

Annexe E

Diagramme Gantt du déroulement des finitions

Cette annexe retrace sur une représentation de Gantt le déroulement des finitions des bureaux de l'Atelier de l'Avenir. On peut remarquer l'incohérence dans la succession des tâches et également la variabilité dans les C/T des différentes tâches.

Annexe F

Rendements pour les finitions intérieures

Cette annexe reprend le calcul des rendements réalisé en vue de, premièrement, convertir les temps de mise en œuvre des finitions des bureaux au bâtiment type tel que décrit dans les résultats, et, deuxièmement, proposer une optimisation du séquençement des finitions de manière à améliorer la productivité du système CIMEDE.

	Niveau	Début	Fin	Durée [jours]	Durée [heures]	Ressources [hommes]	Durée [heure-homme]	Unité	Quantité [(heure-homme)/unité]	Rendement	Unité	Quantité	Durée [heure-homme]	Durée [heures]	Durée [jours] (arrondi)
Ventilation : Pose des gaines sur dalle (RDC) Pose des bouchons, étanchéité air, RF cornières : Trappes planchers Pose des bouchons, étanchéité air, RF cornières : RF cornières		26/03/2013 08:00	27/03/2013 13:00	1,5	11,4	2	22,8	m²	96	0,2375	m²	45	10,6875	5,34375	0,5
		25/03/2013 08:00	25/03/2013 13:00	0,5	3,8	1	3,8	trappe	40	0,095	trappe	24	2,28	2,28	0,5
	RDC	25/03/2013 08:00	26/03/2013 17:00	2	15,2	2	30,4	m²	96	0,316666667	m²	45	14,25	7,125	1
	Niv+1	3/04/2013 08:00	4/04/2013 13:00	1,5	11,4	2,5	28,5	m²	96	0,296875	m²	45	13,359375	5,34375	0,5
Finitions sol : isolation	Moyenne			0						0,306708333		45	13,8046875		
	Isolation projetée (RDC)	27/03/2013 08:00	28/03/2013 17:00	2	15,2	2	30,4	m²	96	0,316666667	m²	45	14,25	7,125	1
	Panneaux résilients (Niv+1)	29/03/2013 08:00	29/03/2013 17:00	1	7,6	1	7,6	m²	96	0,079166667	m²	45	3,5625	3,5625	0,5
	Moyenne			0						0,197916667		45	8,90625		
Pose sanitaires : Raccordement décharge et alimentation sanitaire gaine technique	RDC	27/03/2013 08:00	27/03/2013 17:00	1	7,6	2	15,2	m²	96	0,158333333	m²	45	7,125	3,5625	0,5
	Niv+1	27/03/2013 08:00	27/03/2013 17:00	1	7,6	2	15,2	m²	96	0,158333333	m²	45	7,125	3,5625	0,5
	Moyenne			0						0,158333333		45	7,125		
	Carrelage Lino	30/03/2013 08:00	30/03/2013 13:00	0,5	3,8	2	7,6	m²	96	0,079166667	m²	45	3,5625	1,78125	0,5
Finitions sol : chape humide Finitions sol : Revêtement		3/04/2013 08:00	6/04/2013 17:00	4	30,4	1,5	45,6	m²	96	0,475	m²	45	21,375	14,25	2
		5/04/2013 08:00	8/04/2013 17:00	2	15,2	1	15,2	m²	96	0,158333333	m²	45	7,125	7,125	1
	Moyenne			0						0,316666667		45	14,25		
	RDC	25/03/2013 08:00	26/03/2013 17:00	2	15,2	2,5	38	m²	96	0,395833333	m²	45	17,8125	7,125	1
Pose sanitaires : Pose conduites sanitaires décharge alimentation	Niv+1	5/06/2013 08:00	7/06/2013 17:00	3	22,8	1	22,8	m²	96	0,2375	m²	45	10,6875	10,6875	1,5
	Moyenne			0						0,316666667		45	14,25		
	RDC	8/04/2013 08:00	9/04/2013 17:00	2	15,2	3	45,6	m²	96	0,475	m²	45	21,375	7,125	1
	Niv+1	15/04/2013 08:00	16/04/2013 17:00	2	15,2	3,5	53,2	m²	96	0,554166667	m²	45	24,9375	7,125	1
Ventilation : Pose des gaines de ventilation	Moyenne			0						0,514583333		45	23,15625		
	RDC	8/04/2013 08:00	8/04/2013 17:00	1	7,6	3	22,8	m²	96	0,2375	m²	45	10,6875	3,5625	0,5
	Niv+1	9/04/2013 08:00	9/04/2013 17:00	1	7,6	3	22,8	m²	96	0,2375	m²	45	10,6875	3,5625	0,5
	Moyenne			0						0,2375		45	10,6875		
Enduit et peinture : Enduit plafond	RDC	12/04/2013 08:00	17/04/2013 17:00	4	30,4	2	60,8	m²	96	0,633333333	m²	45	28,5	14,25	2
	Niv+1	28/05/2013 08:00	29/05/2013 17:00	2	15,2	2	30,4	m²	96	0,316666667	m²	45	14,25	7,125	1
	Moyenne			0						0,475		45	21,375		
	RDC	16/04/2013 08:00	17/04/2013 17:00	2	15,2	2	30,4	m²	96	0,316666667	m²	45	14,25	7,125	1
Electricité : Câbles périphériques	Niv+1	18/04/2013 08:00	19/04/2013 17:00	2	15,2	2	30,4	m²	96	0,316666667	m²	45	14,25	7,125	1
	Moyenne			0						0,316666667		45	14,25		
	RDC	16/04/2013 08:00	24/05/2013 17:00	29	220,4	2,291666667	505,083333333	cloison	99	5,101851852	cloison	30	153,0555556	66,7878789	9
	Niv+1	30/05/2013 08:00	7/06/2013 17:00	7	53,2	3,714285714	197,6	cloison	81	2,49508173	cloison	30	73,18518519	19,7037037	2,5
Pose cloisons et contre-cloisons	Moyenne			0						3,770879012		30	113,1203704		
	RDC	30/04/2013 08:00	3/05/2013 17:00	4	30,4	1	30,4	m²	96	0,316666667	m²	45	14,25	14,25	2
	Niv+1	30/05/2013 08:00	31/05/2013 17:00	2	15,2	1,5	22,8	m²	96	0,2375	m²	45	10,6875	7,125	1
	Moyenne			0						0,277083333		45	12,46875		
Electricité : Câbles cloisons	RDC	13/05/2013 08:00	14/05/2013 17:00	1	7,6	1	7,6	cloison	39	0,194871795	cloison	30	5,846153846	5,846153846	1
	Niv+1	4/06/2013 08:00	5/06/2013 17:00	1	7,6	1	7,6	cloison	21	0,361904762	cloison	30	10,85714286	10,85714286	1
	Moyenne			0						0,278388278		30	8,351648352		
	RDC	24/04/2013 08:00	6/06/2013 17:00	32	243,2	2	486,4	cloison	99	4,913131313	cloison	30	147,3939394	73,6969697	9,5
Pose panneaux finitions cloisons	Niv+1	7/06/2013 08:00	14/06/2013 17:00	6	45,6	6,5	296,4	cloison	81	3,659259259	cloison	30	109,7777778	16,8888889	2
	Moyenne			0						4,286195286		30	128,5858586		
	RDC	13/06/2013 08:00	13/06/2013 17:00	1	7,6	4	30,4	Invariable	1	Invariable	Invariable	1	30,4	7,6	1
	Niv+1	14/06/2013 08:00	14/06/2013 17:00	1	7,6	4	30,4	Invariable	1	Invariable	Invariable	1	30,4	7,6	1
Pose sanitaires : Mobiliers	Moyenne			0						30,4		1	30,4		
	RDC	17/06/2013 08:00	17/06/2013 17:00	1	7,6	2	15,2	Invariable	1	Invariable	Invariable	1	15,2	7,6	1
	Niv+1	18/06/2013 08:00	18/06/2013 17:00	1	7,6	2	15,2	Invariable	1	Invariable	Invariable	1	15,2	7,6	1
	Moyenne									15,2		1	15,2		
Electricité : finitions (alarmes, parlophone, luminaires, ...)	RDC	17/06/2013 08:00	17/06/2013 17:00	1	7,6	2	15,2	Invariable	1	Invariable	Invariable	1	15,2	7,6	1
	Niv+1	18/06/2013 08:00	18/06/2013 17:00	1	7,6	2	15,2	Invariable	1	Invariable	Invariable	1	15,2	7,6	1
	Moyenne									15,2		1	15,2		

Données générales			
Journée de travail	7,6	[h]	

Données bureaux				
Elément	Trappe	Surface 1 niv	Cloisons et contre-cloisons	Cloisons
Quantité	40	96	Niv+1	RDC
Unité	[pce]	[m²]	[pce]	[pce]

Données maison type (90 m²)				
Elément	Trappe	Surface 1 niv	Cloisons	
Quantité	24	45	RDC	Niv+1
Unité	[pce]	[m²]	[pce]	[pce]

Annexe G

Proposition d'optimisation pour les finitions intérieures

Cette annexe reprend la proposition de l'optimisation du séquençement des finitions du système CIMEDE basé sur les rendements calculés et moyennés dans l'annexe précédente.

Elément	Niveau					
Quantité	1 pièce					
Processus 1	Ventilation					
Sous-processus	Durée [heure.homme]	Durée (j)	Durée (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Pose des gaines sur dalle (RDC)	10,69	0,67	320,63	2	Kazemir	
Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus			
Temps		Unité	VC/T	L/T	C/T	Unité
93,515625		[min]	320,63	320,63	320,63	[min]
			(VC/T)/(L/T)		Unité	
			100%		[%]	

Elément	Niveau					
Quantité	1 pièce					
Processus 1'	Pose des bouchons, étanchéité air, RF cornières					
Sous-processus	Durée [heure.homme]	Durée (j)	Durée (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Trappes planchers	2,28	0,285	136,8	1	AA - ouvriers	
Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus			
Temps		Unité	VC/T	L/T	C/T	Unité
93,515625		[min]	136,8	136,8	136,8	[min]
			(VC/T)/(L/T)		Unité	
			100%		[%]	

Elément	Niveau					
Quantité	1 pièce					
Processus 2	Pose des bouchons, étanchéité air, RF cornières					
Sous-processus	Durée [heure.homme]	Durée (j)	Durée (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
RF cornières	13,8046875	0,86279297	414,140625	2	AA - ouvriers	
Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus			
Temps		Unité	VC/T	L/T	C/T	Unité
120,234375		[min]	414,140625	414,140625	414,140625	[min]
			(VC/T)/(L/T)		Unité	
			100%		[%]	

Elément	Niveau					
Quantité	1 pièce					
Processus 3	Finitions de sol					
Sous-processus	Durée [heure.homme]	Durée (j)	Durée (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Isolation projetée ou placement résilient	8,90625	1,11328125	534,375	1	ISOTRIE	Isolation projetée (RDC) ; Résilient (Niv+1)
Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus			
Temps		Unité	VC/T	L/T	C/T	Unité
0		[min]	534,375	534,375	534,375	[min]
			(VC/T)/(L/T)		Unité	
			100%		[%]	

Elément	Niveau					
Quantité	1 pièce					
Processus 4	Pose sanitaires					
Sous-processus	Durée [heure.homme]	Durée (j)	Durée (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Raccordement décharge et alimentation sanitaire gaine technique	7,125	0,890625	427,5	1	AA - ouvriers	
Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus			
Temps		Unité	VC/T	L/T	C/T	Unité
0		[min]	427,5	427,5	427,5	[min]
			(VC/T)/(L/T)		Unité	
			100%		[%]	

Elément	Niveau					
Quantité	1 pièce					
Processus 5	Finitions de sol					
Sous-processus	Durée [heure.homme]	Durée (j)	Durée (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Chape humide	3,5625	0,22265625	106,875	2	Chapiste - Carreleur	
Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus			
Temps		Unité	VC/T	L/T	C/T	Unité
805,125		[min]	106,875	106,875	106,875	[min]
			(VC/T)/(L/T)		Unité	
			100%		[%]	

Elément	Niveau					
Quantité	1 pièce					
Processus 6	Finitions de sol					
Sous-processus	Durée [heure.homme]	Durée (j)	Durée (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Carrelage ou lino	14,25	0,890625	427,5	2	Chapiste - Carreleur / Dragas	
Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus			
Temps		Unité	VC/T	L/T	C/T	Unité
0		[min]	427,5	427,5	427,5	[min]
			(VC/T)/(L/T)		Unité	
			100%		[%]	

Elément	Niveau					
Quantité	1 pièce					
Processus 7	Pose sanitaires					
Sous-processus	Durée [heure.homme]	Durée (j)	Durée (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Pose conduites sanitaires décharge alimentation	14,25	0,890625	427,5	2	AA - ouvriers	
Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus			
Temps		Unité	VC/T	L/T	C/T	Unité
35,625		[min]	427,5	427,5	427,5	[min]
			(VC/T)/(L/T)		Unité	
			100%		[%]	

Elément	Niveau									
Quantité	1 pièce									
Processus 8	Ventilation									
Sous-processus	Durée [heure.homme]	Durée (j)	Durée (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques				
Pose des gaines de ventilation	23,15625	0,96484375	463,125	3	Kazemir					
		Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus					
		Temps	Unité		VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
		0	[min]		463,125	463,125	463,125	[min]	100%	[%]

Elément	Niveau									
Quantité	1 pièce									
Processus 9	Pose des bouchons, étanchéité air, RF cornières									
Sous-processus	Durée [heure.homme]	Durée (j)	Durée (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques				
Bouchons Steico	10,6875	0,66796875	320,625	2	AA - ouvriers					
		Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus					
		Temps	Unité		VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
		106,875	[min]		320,625	320,625	320,625	[min]	100%	[%]

Elément	Niveau									
Quantité	1 pièce									
Processus 10	Enduit et peinture									
Sous-processus	Durée [heure.homme]	Durée (j)	Durée (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques				
Enduit plafond	21,375	0,890625	427,5	3	AA - ouvriers					
		Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus					
		Temps	Unité		VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
		0	[min]		427,5	427,5	427,5	[min]	100%	[%]

Elément	Niveau									
Quantité	1 pièce									
Processus 11	Electricité									
Sous-processus	Durée [heure.homme]	Durée (j)	Durée (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques				
Câbles périphériques	14,25	0,890625	427,5	2	K-Seppi					
		Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus					
		Temps	Unité		VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
		703,7037037	[min]		427,5	427,5	427,5	[min]	100%	[%]

Elément	Niveau									
Quantité	1 pièce									
Processus 12	Pose cloisons									
Sous-processus	Durée [heure.homme]	Durée (j)	Durée (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques				
Pose cloisons	113,1203704	2,35667438	1131,2037	6	AA - ouvriers					
		Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus					
		Temps	Unité		VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
		0	[min]		1131,2037	1131,2037	1131,2037	[min]	100%	[%]

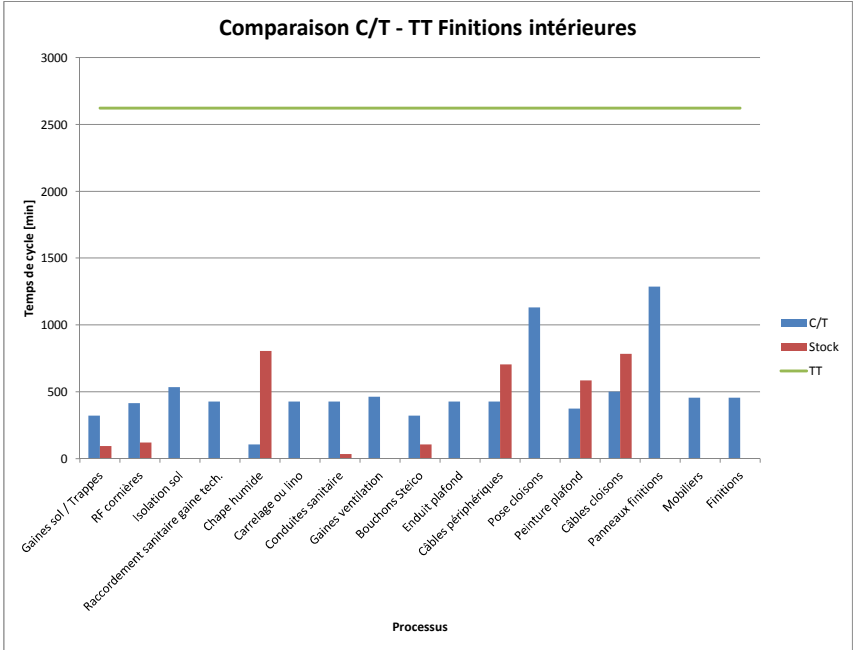
Elément	Niveau									
Quantité	1 pièce									
Processus 13	Enduit et peinture									
Sous-processus	Durée [heure.homme]	Durée (j)	Durée (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques				
Peinture plafond	12,46875	0,77929688	374,0625	2	AA - ouvriers					
		Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus					
		Temps	Unité		VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
		585,9375	[min]		374,0625	374,0625	374,0625	[min]	100%	[%]

Elément	Niveau									
Quantité	1 pièce									
Processus 14	Electricité									
Sous-processus	Durée [heure.homme]	Durée (j)	Durée (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques				
Câbles cloisons	8,351648352	1,04395604	501,098901	1	K-Seppi					
		Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus					
		Temps	Unité		VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
		784,7596848	[min]		501,098901	501,098901	501,098901	[min]	100%	[%]

Elément	Niveau									
Quantité	1 pièce									
Processus 15	Finitions cloisons									
Sous-processus	Durée [heure.homme]	Durée (j)	Durée (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques				
Panneaux finitions	128,5858586	2,67887205	1285,85859	6	AA - ouvriers					
		Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus					
		Temps	Unité		VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
		0	[min]		1285,85859	1285,85859	1285,85859	[min]	100%	[%]

Elément	Niveau					
Quantité	1 pièce					
Processus 16	Pose sanitaires					
Sous-processus	Durée [heure.homme]	Durée (j)	Durée (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Mobiliers	30,4	0,95	456	4	AA - ouvriers	
Stockage entre les 2 processus			Mesures du processus			
Temps		Unité	VC/T	L/T	C/T	Unité
0		[min]	456	456	456	[min]
			(VC/T)/(L/T)			
			100%			
			[%]			
Elément	Niveau					
Quantité	1 pièce					
Processus 17	Electricité					
Sous-processus	Durée [heure.homme]	Durée (j)	Durée (')	Nbre d'ouvriers	Rôles des ouvriers	Remarques
Finitions	15,2	0,95	456	2	K-Seppe	(alarmes, parlophone, luminaires, ...)
			Mesures du processus			
VC/T		L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
456		456	456	[min]	100%	[%]

Résumé							
Numéro processus	Processus	VC/T	L/T	C/T	Unité	(VC/T)/(L/T)	Unité
1	Pose des gaines sur dalle (RDC) ou Trappes planchers (Niv+1)	320,625	320,625	320,625	[min]	100%	[%]
	Stock	0	93,515625	93,515625	[min]	0%	[%]
2	RF cornières	414,140625	414,140625	414,140625	[min]	100%	[%]
	Stock	0	120,234375	120,234375	[min]	0%	[%]
3	Isolation projetée ou placement résilient	534,375	534,375	534,375	[min]	100%	[%]
	Stock	0	0	0	[min]	#DIV/0!	[%]
4	Raccordement décharge et alimentation sanitaire gaine technique	427,5	427,5	427,5	[min]	100%	[%]
	Stock	0	0	0	[min]	#DIV/0!	[%]
5	Chape humide	106,875	106,875	106,875	[min]	100%	[%]
	Stock	0	805,125	805,125	[min]	0%	[%]
6	Carrelage ou lino	427,5	427,5	427,5	[min]	100%	[%]
	Stock	0	0	0	[min]	#DIV/0!	[%]
7	Pose conduites sanitaires décharge alimentation	427,5	427,5	427,5	[min]	100%	[%]
	Stock	0	35,625	35,625	[min]	0%	[%]
8	Pose des gaines de ventilation	463,125	463,125	463,125	[min]	100%	[%]
	Stock	0	0	0	[min]	#DIV/0!	[%]
9	Bouchons Steico	320,625	320,625	320,625	[min]	100%	[%]
	Stock	0	106,875	106,875	[min]	0%	[%]
10	Enduit plafond	427,5	427,5	427,5	[min]	100%	[%]
	Stock	0	0	0	[min]	#DIV/0!	[%]
11	Câbles périphériques	427,5	427,5	427,5	[min]	100%	[%]
	Stock	0	703,703704	703,7037037	[min]	0%	[%]
12	Pose cloisons	1131,2037	1131,2037	1131,203704	[min]	100%	[%]
	Stock	0	0	0	[min]	#DIV/0!	[%]
13	Peinture plafond	374,0625	374,0625	374,0625	[min]	100%	[%]
	Stock	0	585,9375	585,9375	[min]	0%	[%]
14	Câbles cloisons	501,098901	501,098901	501,0989011	[min]	100%	[%]
	Stock	0	784,759685	784,7596848	[min]	0%	[%]
15	Panneaux finitions	1285,85859	1285,85859	1285,858586	[min]	100%	[%]
	Stock	0	0	0	[min]	#DIV/0!	[%]
16	Mobiliers	456	456	456	[min]	100%	[%]
	Stock	0	0	0	[min]	#DIV/0!	[%]
17	Finitions	456	456	456	[min]	100%	[%]
	Total	8501,48932	11737,2652	1285,858586	[min]	72%	[%]



Bibliographie

- [03-02] NBN B 03-003 : *Déformations des structures, Valeurs limites de déformation - Bâtiments*. Norme Belge, Institut belge de normalisation (IBN), association sans but lucratif, Bruxelles, Belgique, 2002.
- [ARWYWL12] Hamzah ABDUL RAHMAN, Chen WANG et Irene YEN WUI LIM : Waste processing framework for non-value-adding activities using lean construction. *Journal of Frontiers in Construction Engineering*, 1:8–13, Décembre 2012.
- [ASDSM99] Abdusalam A. AL-SUDAIRI, James E. DIEKMANN, Anthony D. SONGER et Brown Hyman M. : Simulation of construction processes : Traditionnal practices versus lean principles. In *Seventh Conference of the International Group for Lean Construction*, volume 7, pages 39–50, University of California Berkeley, California, USA, Juillet 1999. Lean Construction Institute.
- [Ave13] Atelier de l’ Avenir : *CIMEDE Evolving Building Systems*. <http://www.cimede.be/>, Août 2013.
- [Bal99] Glenn BALLARD : Improving work flow reliability. In *Seventh Conference of the International Group for Lean Construction*, volume 7, pages 275–286, University of California Berkeley, California, USA, Juillet 1999. Lean Construction Institute.
- [Bal00] Herman Glenn BALLARD : *The last planner system of production control*. Thèse de doctorat, the University of Birmingham, 2000.
- [Bal04] Michael BALLÉ : Jidoka, le deuxième pilier du lean. Rapport technique, Lean Working Papers - Télécom Paris, 2004.
- [Bal12] Michael BALLÉ : Lean ingénierie, appliquer l’approche lean en conception et développement produit. *Management & Finance*, mars 2012.
- [Bar11] Nadia BARHDADI : *Mise en oeuvre, tolérancement et performances de systèmes constructifs industrialisés de bâtiments*. Travail de fin d’études, Université de Liège, 2011.

- [BB05] Michael BALLÉ et Godefroy BEAUVALLET : Le lean en france. *Préface à la deuxième édition française de Système Lean, Penser l'entreprise au plus juste, de Jim Womack et Dan Jones*, 2005.
- [Bed11] Pierre BEDRY : Lean chantier, le lean adapté au btp : Pourquoi ? c'est quoi ? comment ? (webinar). Business 21, Février 2011.
- [BPD⁺03] James BARLOW, Childerhouse PAUL, Gann DAVID, Hong-Minh SÉVERINE, Naim MOH et Ozaki RITSUKO : Choice and delivery in house-building : lessons from japan for uk housebuilders. *Building Research & Information*, 31(2):134–145, 2003.
- [Cat12a] Romuald CATOUL : *Cloisons intérieures modulables - Panneau de cloison en module de 600 mm*. CIMEDE, Evolving Building System, Novembre 2012. Modification au document de synthèse de la recherche remis à l'Atelier de l'Avenir - Ref. CLOI M600.
- [Cat12b] Romuald CATOUL : *Enveloppe - Élément de plancher - Module 1200 mm*. CIMEDE, Evolving Building System, Décembre 2012. Document de synthèse de la recherche remis à l'Atelier de l'Avenir - Ref. ENV PL M1200.
- [CVFH12] Bruno COLLARD, Alberto VALLINA FERNANDEZ et Edouard HALLEUX : *Planification des constructions, coordination et sécurité des chantiers*. Rapport de Travail Pratique, Université de Liège, Décembre 2012.
- [dl13] Atelier de L'AVENIR : Construction comportant des cloisons amovibles. Requête en délivrance d'un brevet, Atelier de l'Avenir SCRLF, Office de la propriété intellectuelle, Ministère de l'économie, Belgique, Mars 2013. Demande de brevet n° 2013/0226.
- [DMR04] JOHN DREW, BLAIR MCCALLUM et STEFAN ROGGENHOFER : Objectif lean. *Mc Kinsey et company*, 2004.
- [Duy11] Gaëtan DUYCKAERTS : *Etude de rentabilité appliquée à la construction industrialisée de maisons évolutives - CIMEDE*. Travail de fin d'études, Université de Liège, 2011.
- [FA10] Lincoln H FORBES et Syed M AHMED : *Modern construction : lean project delivery and integrated practices*. CRC Press, 2010.
- [Fer96] S. FERON : *Le marché belge pour les Ossatures Métalliques Légères destinées à la Construction de Bâtiments de "faible hauteur"*. RDCS (Recherche & Développement Cockerill Sambre) - Groupe Arcelor, Juin 1996.
- [Fra50] Benjamin FRANKLIN : *Advice to a young tradesman*, volume 1748. Philadelphia, 1750.
- [Fra12] Jean-Marc FRANSSSEN : *Construction en bois (Cours à l'intention des Ingénieurs Civils Architectes et des Ingénieurs Civils des Constructions)*. Université de Liège, 2012.

- [Gar10] David GARNIER : *La value stream mapping : un outil de représentation des procédés et de réflexion pour l'amélioration Lean appliquée à l'industrie pharmaceutique*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Faculté de Pharmacie de Grenoble, 2010.
- [Gob13] Christophe GOBIN : Industrialisation et construction. *Techniques de l'ingénieur L'ingénierie de la construction*, base documentaire : TIB236DUO.(ref. article : c3055), 2013. fre.
- [HB94a] Greg HOWELL et Glenn BALLARD : Implementing lean construction : Improving downstream performance. *In 2nd Annual Conference on Lean Construction at Catolica Universidad de Chile*, Santiago, Chile, Septembre 1994. Lean Construction Institute.
- [HB94b] Greg HOWELL et Glenn BALLARD : Implementing lean construction : Reducing inflow variation. *In 2nd Annual Conference on Lean Construction at Catolica Universidad de Chile*, Santiago, Chile, Septembre 1994. Lean Construction Institute.
- [HB94c] Greg HOWELL et Glenn BALLARD : Implementing lean construction : Stabilizing work flow. *In 2nd Annual Conference on Lean Construction at Catolica Universidad de Chile*, Santiago, Chile, Septembre 1994. Lean Construction Institute.
- [How99] Gregory A. HOWELL : What is lean construction - 1999. *In Seventh Conference of the International Group for Lean Construction*, volume 7, pages 1–10, University of California Berkeley, California, USA, Juillet 1999. Lean Construction Institute.
- [Jal04] Emmanuel JALLAS : Cartographie des flux de valeur - value stream mapping : Quelle stratégie adopter pour réduire ses coûts de production ?, 2004.
- [KK12a] Sergio KEMMER et Lauri KOSKELA : Developing a lean model for production management of refurbishment projects. *In Proceedings IGLC-20 : Conference of the International Group for Lean Construction*, San Diego, USA, Juillet 2012. Lean Construction Institute.
- [KK12b] Anssi KOSKENVESA et Lauri KOSKELA : Ten years of last planner in finland - where are we? *In Proceedings IGLC-20 : Conference of the International Group for Lean Construction*, San Diego, USA, Juillet 2012. Lean Construction Institute.
- [Kos92] Lauri KOSKELA : *Application of the new production philosophy to construction*, volume 72. Stanford university (Technical Report No. 72, Center for Integrated Facility Engineering, Department of Civil Engineering). Stanford, CA, 1992.
- [KR12] Sebastian KREUSCH et Jean-Marie RIGO : *Planification des constructions, coordination et sécurité des chantiers (Cours à l'intention des Ingénieurs Civils Architectes et des Ingénieurs Civils des Constructions)*. Université de Liège, 2012.

- [KSR12] Lauri KOSKELA, Rafael SACKS et John ROOKE : A brief history of the concept of waste in production. *In Proceedings IGLC-20 : Conference of the International Group for Lean Construction*, San Diego, USA, Juillet 2012. Lean Construction Institute.
- [Kub12] Sylvain KUBICKI : *Gestion de projets II (Cours à l'intention des Ingénieurs Civils Architectes et des Ingénieurs Civils des Constructions)*. Université de Liège, 2012.
- [KV01] Lauri KOSKELA et Ruben VRIJHOEF : Is the current theory of construction a hindrance to innovation? *Building Research & Information*, 29(3):197–207, 2001.
- [LA76] Samir LOTFI ALI : *La mesure de la productivité pour le contrôle d'un système de production*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie à Paris, 1976.
- [Lar12] LAROUSSE, éditeur. *Le Petit Larousse illustré 2013*. Edition 2013 édition, Juin 2012.
- [LDSB99] Seung-Hyun LEE, James E. DIEKMANN, Anthony D. SONGER et Hyman BROWN : Identifying waste : Applications of construction process analysis. *In Seventh Conference of the International Group for Lean Construction*, volume 7, pages 63–72, University of California Berkeley, California, USA, Juillet 1999. Lean Construction Institute.
- [Les06] Jerker LESSING : Industrialised house-building. *Licentiate thesis, Lund Institute of Technology, Sweden*, 2006.
- [LS12] Johan LARSSON et Peter SIMONSSON : Decreasing complexity of the on-site construction process using prefabrication : a case study. *In Proceedings IGLC-20 : Conference of the International Group for Lean Construction*, volume 20, pages 841–850, San Diego, USA, Juillet 2012. Lean Construction Institute.
- [MAM12] Mansooreh MOGHADAM, Aladdin ALWISY et AL MOHAMED : Integrated bim/lean base production line schedule model for modular construction manufacturing. *In Construction Research Congress 2012@ sConstruction Challenges in a Flat World*, pages 1271–1280. ASCE, 2012.
- [Mou10] Marc MOUSLI : Taiichi ohno, l'homme qui pensait à l'envers. *Alternatives économiques*, (1):77–77, 2010.
- [Ohn78] Taiichi OHNO : *L'Esprit Toyota*. Productivité de l'Entreprise. Masson - Paru en France en 1989, 2 édition, 1978.
- [Ohn88] Taiichi OHNO : *Toyota production system : beyond large-scale production*. Productivity Pr, 1988.
- [Par09] Rebecca PARTOUCHE : *A lean model for construction management of tall office/commercial buildings*. Thèse de doctorat, Technion–Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, 2009.

- [PDFS⁺12] Vishal PORWAL, Bhargav DAVE, Jose FERNANDEZ-SOLIS, Lauri J KOSKELA et HS MEHTA : State of production plan reliability - a case study from india. *In Proceedings IGLC-20 : Conference of the International Group for Lean Construction*, San Diego, USA, Juillet 2012. Lean Construction Institute.
- [Pol05] Quentin POLIS : *Comparaison des performances de techniques traditionnelles de construction de logements, par rapport à des bâtiments à ossature (bois ou acier)*. Travail de fin d'études, Université de Liège, 2005.
- [RS03] Mike ROTHER et John SHOOK : *Learning to see : value stream mapping to create value and eliminate muda*. Lean Enterprise Institute, Inc., 2003.
- [Sch12] Dimitri SCHMITZ : Systems engineering applied to a building construction systems design methodology. *In IFIP WG 5.1*, Montréal, Canada, Juillet 2012. Récompensé par un certificat de mérite.
- [SL13] Dimitri SCHMITZ et Pierre LECLERCQ : *Gestion de projets I (Cours à l'intention des Ingénieurs Civils Architectes et des Ingénieurs Civils des Constructions)*. Université de Liège, 2013.
- [SP09] R SACKS et R PARTOUCHE : Empire state building project : Archetype of "mass construction". *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(6):702–710, 2009.
- [Tau97] J. TAURANAC : *The Empire State Building : the making of a landmark*. St. Martin's Griffin, 1997.
- [Tem77] Englebert TEMGOUA : *La construction à ossature bois au Cameroun : analyse des conditions de son développement, de son industrialisation et des techniques nouvelles de construction*. Travail de fin d'études, Université de Liège, 1977.
- [Toy96] TOYOTA : *The Toyota Production System*. International Public Affairs Division, Operations Management Consulting Division, 1996.
- [TSL⁺13] Souha TAHRANI, Dimitri SCHMITZ, Michael LEONARD, Thierry-Eliot VILLENEUVE, Vincent LABERGE, Fernando VALDIVIESO et Daniel FORGUES : Towards a concept of operation using bim technologies to improve productivity in construction projects. *In CSCE 2013 General Conference - Congrès général 2013 de la SCGC*, Montréal, Québec, Mai 2013.
- [WF98] Carol WILLIS et Donald FRIEDMAN : *Building the Empire State Building*. W.W. Norton & Company, New York, 1998.
- [Wil03] James M. WILSON : Gantt charts : A centenary appreciation. *European Journal of Operational Research*, 149(2):430 – 437, 2003.
- [WJ09] James P. WOMACK et Daniel T. JONES : *Système Lean : Penser l'entreprise au plus juste*. Pearson, 2 édition, 2009.

- [WTW93] GH WATSON, RL TUCKER et JK WALTERS : Lean production in construction. *In Automation and robotics in construction X : proceedings of the 10th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), Houston, Texas, USA, 24-26 May, 1993*, page 47. Elsevier Science Ltd, 1993.