

Amélioration Continue des Performances sur Chantier par Optimisation des Zones de Stockage et d'Approvisionnement

Mémoire présenté par
Raphaël LASSAUX , Antoine DE HEMPTINNE

en vue de l'obtention du grade de Master
Ingénieur civil des constructions

Promoteur(s)
Pierre LATTEUR,
Pedro DA GUIA(Besix),
Thomas VANDENBERGH(Besix)

Lecteur(s)
Sébastien GOESSENS, Bernard COLS

Année académique 2016-2017

The greatest obstacle to discovery is not
ignorance - it is the illusion of knowledge

Daniel J. Boorstin

Abstract

L'industrie de la construction est un moteur important de l'économie belge. Elle emploie des milliers de personnes à travers le pays et la nette croissance enregistrée pour l'année 2016 nous donne un aperçu de la bonne santé de ce secteur. Les récents résultats à court terme nous font cependant parfois oublier un constat moins réjouissant et valable depuis 20 ans : le secteur de la construction souffre d'un important retard en terme de productivité comparé aux autres branches du secteur secondaire¹.

Là où d'autres secteurs comme l'industrie manufacturière sont parvenus à augmenter significativement leur production ces dernières années afin de répondre à une demande toujours plus grande des consommateurs, l'industrie de la construction semble embourbée dans son mode de fonctionnement classique l'empêchant de rattraper son retard.

Cette étude vise donc à premièrement dresser le constat du secteur de la construction afin de pouvoir s'expliquer ce décalage. Dans ce contexte, nous aborderons le sujet du Lean Construction. Moins un outil qu'une philosophie générale en tant que telle, elle sera le fil rouge de notre travail.

Dans un deuxième temps, nous développerons deux propositions basées sur l'optimisation des zones de stockage d'un chantier et qui permettent d'augmenter la production. La première se concentrant sur la possibilité d'un stockage vertical mettra en évidence les gains de temps et d'espace pouvant être réalisés. La deuxième proposition consiste en l'élaboration d'un algorithme de placement des zones de stockage. Mis en évidence par l'analyse d'un cas concret, cette proposition permettrait également de réaliser un gain de temps intéressant.

Finalement, nos résultats aboutissent à un gain en temps et en espace occupé au sol. D'une part, le stockage vertical permettrait d'économiser jusqu'à 14% sur les activités d'assemblage des ferrailages et de réaliser un gain d'espace de 30% sur la zone de stockage des armatures. D'autre part, l'analyse d'un placement logique des zones de stockage par l'algorithme développé pourrait aboutir à un gain sur les temps de déplacement de matériaux allant jusqu'à 14%.

Ces solutions, mises en place s'inscrivent dans ce défi d'optimisation de la productivité rencontré chaque jour sur les chantiers belges.

1. En économie, le secteur secondaire, parmi les trois secteurs économiques définis dans la comptabilité nationale, regroupe les activités liées à la transformation des matières premières.

Abstract

The construction industry is a key industry in the Belgian economy. It brings thousands of employments all over the country and the net growth of 2016 gives us an insight of the good health of this sector. However, the latest good news on short term tend to overshadow a less pleasing observation that is valid for more than twenty years : «the construction sector suffers from a lack of productivity compare to the rest of the manufacturing industry».

While other actors of the manufacturing industry (especially the automotive) succeeded in boosting their production in the past years in order to meet the still rising needs of the consumers, the construction industry seems to be stuck in a time warp.

In the first place, this study aims to draw a report of the production in the construction sector to be able to give an explanation of this lag. This subject will lead us to the topic of Lean Construction. More a complete way of thinking and a philosophy then a toolbox to implement on projects, the Lean Construction will be the red lead of our thesis.

In the second place, we will develop two submissions based on the optimisation of the storage areas on a construction site. Their common goal will be to increase the productivity on site.

The first submission will focus on the feasibility of a system of vertical storage. It will bring to light the possible gains in time and space (of the storage area) that this solution could allow.

The second submission consists in the study of the placing of the storage areas with the help of an algorithm that tried to make it as realistic and unbiased as possible. The analysis of a case study will also point the potential gain in time that we could expect if the algorithm was used.

Finally, our results from the first and second submission will give us a total gain in time and space. From the one hand, the vertical storage would allow to spare in the best case up to 14% on the steel reinforcement activities and gain 30% on the storage space needed for the steel. On the other hand, the optimisation of a logic placing of the storage areas, helped by our algorithm, would result in a time gain on the implementation of the materials on site. The potential gain would be up to 14% for some materials.

The solutions, developed in this thesis, aim to participate to the optimisation of the productivity that we try to improve every single day in Belgium.

Remerciements

Ce travail de fin d'étude en ingénierie civil des construction à l'*Ecole Polytechnique de Louvain* (UCLouvain-Belgique) est le fruit de la recherche de deux étudiants convaincus que l'exécution et la préparation des chantiers devraient être étudiées d'avantage académiquement.

Il n'aurait pas été possible sans la collaboration du plus grand groupe actif dans la construction en Belgique, Besix. En effet, des remerciements particuliers sont adressés aux promoteurs **Pedro Da Guia** et **Thomas Vandenberg** pour l'encadrement et les ressources apportées au sein de Besix. En outre, la disponibilité et le partage d'expériences des différents intervenants sur les chantiers visités (Besix ou Valens) ont permis de rendre l'analyse plus réaliste et le travail réalisé, plus ancré dans le monde réel. L'encadrement académique a été assuré par le promoteur **Pierre Latteur** qui a su faire avancer la réflexion et qui a soutenu ce mémoire d'un point de vue académique.

Finalement, des remerciements sont adressés au personnel de Puratos et plus particulièrement à **Daniel Malcorps**, son CEO, qui a mis en place une demie-journée de découverte de l'excellence opérationnelle au sein de son groupe. Ensuite, Florent Suain du CSTC (Centre scientifique de la construction) et l'équipe de SUCCESS du LIST (Luxembourg Institute of Technology) ont permis d'orienter les recherches dans les directions les plus appropriées.

Table des figures

1	Évolution du taux de marge brut avant et après la crise financière de 2008	3
2	Démarche suivie au cours de notre étude	7
3	L'évolution de la production de voitures depuis 50 ans. L'artisanat a laissé place à la standardisation du travail et aux lignes de production avec Ford pour ensuite se diriger vers le Lean appliqué alors chez Toyota ou encore Tesla	11
4	Le Toyota Production System [1]	12
5	Exemple de mauvais stockage sur le projet City Dox (Besix)	16
6	Zone de stockage sur le chantier The One (Valens)	17
7	Exemple d'attente sur City Dox	17
8	Exemple de débrouille sur City Dox	19
9	Les différents temps d'utilisation des grues sur le chantier de Melun	19
10	Une augmentation de la production a été réalisée après la mise en place du Lean (planning collaboratif, ordre sur le chantier et élimination des gaspillages	20
11	Stock d'armatures en bordure de chantier	21
12	Exemple de désordre dans une zone de stockage	21
13	Stock type d'une entreprise manufacturière	22
14	Stock type sur un chantier de construction	23
15	Exemple de l'état des pistes sur chantier	24
16	Répartition standard des coûts pour un chantier de construction de type immeuble (<i>mais d'œuvre comprise</i>)	24
17	Répartition du temps consacré aux deux phases principales de construction sur les chantiers observés	25
18	Décomposition d'une journée de travail en phase de gros oeuvre	26
19	Répartition de l'espace utilisé sur les chantiers observés	27
20	Les éléments sont stockés les uns sur les autres faute de place	28
21	Autre exemple d'un manque de place forçant le désordre	28
22	Palette de blocs silico-calcaire déchargée directement sur chantier	29
23	Exemple de sur-stock d'acier sur chantier	30
24	Étiquette d'identification de lot d'armatures	30
25	Réalisation de l'assemblage du ferrailage d'une poutre/colonne	30
26	Réalisation de l'assemblage du ferrailage d'un voile	31
27	Cartographie des chaînes de valeur du stock d'armatures	31
28	Répartition du temps d'assemblage du ferrailage d'une poutre/colonne	32
29	Répartition du temps d'assemblage du ferrailage d'un voile	32

30	Comparaison AVA et ASVA pour l'assemblage du ferrailage d'une poutre/colonne	33
31	Comparaison AVA et ASVA pour l'assemblage du ferrailage d'un voile	33
32	Comparaison AVA et ASVA pour l'assemblage du ferrailage d'une poutre/colonne (pourcentage)	33
33	Comparaison AVA et ASVA pour l'assemblage du ferrailage d'un voile (pourcentage) . . .	33
34	Localisation du stockage d'armatures sur le chantier City Dox	34
35	Aperçu du stock d'armatures sur le chantier City Dox	34
36	Plan du stock d'armatures sur le chantier City Dox en situation réelle (sans optimisation par stockage vertical)	34
37	Mode d'accrochage des armatures façonnées sur la structure	36
38	Accroche d'armatures façonnées	36
39	Structure de stockage vertical d'armatures vue de côté	36
40	Structure de stockage vertical d'armatures vue de face	37
41	Structure de stockage vertical d'armatures vue de haut	37
42	Simulation de résistance de la structure pour des barres de 4 mètres de long	38
43	Concentration de contraintes acceptables à la connexion bras/sous-structure	38
44	Simulation de résistance de la structure pour des barres de 6 mètres de long	38
45	Concentration de contraintes acceptables à la connexion bras/sous-structure	38
46	Répartition du temps d'assemblage du ferrailage d'une poutre/colonne avec stockage vertical	39
47	Répartition du temps d'assemblage du ferrailage d'un voile avec stockage vertical	39
48	Comparaison AVA et ASVA pour l'assemblage du ferrailage d'une poutre/colonne avec stockage vertical	39
49	Comparaison AVA et ASVA pour l'assemblage du ferrailage d'un voile avec stockage vertical	39
50	Comparaison AVA et ASVA pour l'assemblage du ferrailage d'une poutre/colonne (pourcentage)	40
51	Comparaison AVA et ASVA pour l'assemblage du ferrailage d'un voile (pourcentage) . . .	40
52	Comparaison des temps d'assemblage entre le cas réel et le cas optimisé par stockage vertical	40
53	Plan du stock d'armatures sur le chantier City Dox pour une situation optimisée par un système de stockage vertical	42
54	Exemple d'une zone de stockage non prise en compte	44
55	Comparaison du stockage industriel et de la construction	46
57	Circulation interne inspiré de l'industrie	47
58	Organisation du stockage par sous-traitant	48
59	Hopital de Melun en construction	49
60	Hopital de Melun :plan	50

61	L'algorithme détaillé dans cette partie	51
62	Simplifications géométriques	52
63	Les documents fournis et les différentes hypothèses émises sur ces documents	53
64	Les documents fournis, les différentes hypothèses émises sur ces documents et les données à entrer dans l'algorithme	54
65	L'angle θ est défini par la rotation de la grue (en jaune) entre la position de la zone de stockage à la zone de demande	58
66	Algorithme	59
67	Les différents cas à simuler	60
68	Résultats pour le cas réel	61
69	Résultats pour le cas optimisé sans contrainte	62
70	Résultats pour le cas optimisé avec contraintes	64
71	Résultats pour le cas défavorable	65
72	Comparaison relative entre les différents cas simulés avec la solution proposée par Besix (cas réel)	67
73	Répartition du temps d'utilisation de la grue, il comprend le temps d'installation, d'accro- chage et décrochage (en gris), le temps de rotation (en bleu) et le temps concernant les autres mouvements (levage, descente et déplacements du chariot)	68
74	Gain	69
75	Répartition des mouvements de grue	70
76	Interface graphique à l'aide du logiciel Matlab	71
77	Cartographie des chaînes de valeur du stock d'armatures amélioré par le stockage vertical et l'optimisation de leurs répartitions	74

Liste des tableaux

1	Comparaison de l'industrie automobile et la construction	15
2	Assemblages des ferrailages de poutres/colonnes produits en un jour pour le cas réel et le cas optimisé par stockage vertical	41
3	Assemblages des ferrailages de voiles produits en un jour pour le cas réel et le cas optimisé par stockage vertical	41
4	Les zones de stockage à localiser	52
5	Caractéristiques de la Grue G7	54
6	Temps unitaires	55
7	Les zones de stockage à localiser et la destination de leurs matériaux	56

8	Résultats obtenus pour le cas des plans de Besix, qui servira de référence pour la comparaison	61
9	Résultats obtenus pour le cas optimisé avec stockage autorisé tout autour du bâtiment	63
10	Résultats obtenus pour le cas optimisé avec stockage à l'extérieur du bâtiment uniquement	64
11	Résultats obtenus pour le cas défavorable avec maximisation des angles de rotation	66
12	Les zones de stockage à localiser	110

Liste des abréviations

- AVA - Activité à Valeur Ajoutée
- ASVA - Activité Sans Valeur Ajoutée
- BTP - Bâtiments et Travaux Publics
- CSTC - Centre Scientifique et Technique de la Construction
- LIST - Luxembourg Institute of Science and Technology
- MEP - Mechanical Electrical and Plumbing
- MIT - Massachusetts Institute of Technology
- NVA - Non Valeur Ajoutée
- TPS - Toyota Production System
- PME - Petites et Moyennes Entreprises
- TFE - Travail de Fin d'Etude
- RFID - RadioFrequency IDentification
- SUCCESS - Sustainable Urban Consolidation CentRES for conStruction
- VA - Valeur Ajoutée
- VSM - Value Stream Mapping

Lexique

- Automatisation : *terme inventé du japonais faisant référence à la mise en autonomie des équipes et l'automatisation des processus*
- Centre de Consolidation : *centre logistique où les différents sous-traitants viennent déposer leur marchandises. Elles sont ainsi rassemblées avant d'être acheminées sur le chantier.*
- Chaîne de valeur : *tout le processus de création du produit où les activités à valeur ajoutée sont répertoriées.*
- Charge de grue : *c'est la somme de toutes les activités de la grue sur une journée exprimée en heures ou minutes.*
- Clark : *marque entrée dans le langage courant désignant un chariot élévateur.*
- Europalette : *palette en bois à quatre entrées respectant des prescriptions européennes.*

- Just-in-Case : *principe de stocker en abondance pour éviter que si une défaillance arrive la production ne soit totalement arrêtée.*
- Just-in-Time : *pilier du Lean, c'est le fait de livrer la juste quantité au meilleur temps.*
- Lean : *philosophie visant à éliminer les gaspillages*
- Lean Construction : *Lean appliqué aux spécificités de la construction*
- Productivité : *rapport de la valeur ajoutée sur la rémunération*
- Tampons : *petits stocks entre chaque opération de la zone de production*
- Taux Marge Brut : *représente le gain ou la perte monétaire (en %) réalisé par une société.*
- Valeur ajoutée : *ce dont pourquoi le client paye qui apporte un plus au produit.*
- Saturation : *c'est le rapport de la charge de la grue par journée de travail, exprimée en pourcentage.*
- Value Stream Mapping : *visualisation graphique de la chaîne de valeur*

Table des matières

1	Introduction	3
2	Objectifs du TFE	5
2.1	Influences et inspirations	5
2.2	Pistes proposées	5
3	Méthodologie	7
3.1	BLOC 1 : Recherche et documentation bibliographique	7
3.2	BLOC 2 : Visites d'entreprise active dans d'autres secteurs	7
3.3	BLOC 3 : Détermination du/des points critiques à traiter	9
3.4	BLOC 4 : Visites de chantiers et interviews	9
3.5	BLOC 5 : Théorisation des deux pistes proposées	10
4	Le Lean	11
4.1	Les origines	11
4.2	Le concept	12
4.2.1	Valeur	13
4.2.2	Déchets	14
4.2.3	Productivité	14
4.3	Le Lean Construction	14
4.3.1	L'état actuel	14
4.3.2	Les particularités du domaine de la construction	15
4.3.3	Les sources de gaspillages	15
4.3.4	Exemple	19
5	Le stockage vertical	21
5.1	Etat actuel dans l'industrie manufacturière	22
5.2	Etat actuel sur chantier	23
5.2.1	Coûts	24
5.2.2	Planning	25
5.2.3	Place disponible et utilisée	26
5.3	Constats et concentration sur le ferrailage	27
5.4	Réponse à un besoin	28
5.4.1	Problématique de la place	28
5.4.2	Problématique du Just-in-Time et du sur-stock	29
5.5	Observations et analyse des données récoltées	30

5.5.1	Données liées au temps	30
5.5.2	Données liées à l'espace	33
5.6	Cahier des charges	35
5.7	Système proposé	35
5.8	Gain apporté	38
5.8.1	Gain temporel	38
5.8.2	Gain d'espace	41
5.9	Conclusion	42
6	Optimisation des zones de stockages	44
6.1	Caractéristiques d'un stock sur chantier	45
6.2	Critères de performances	46
6.3	Recommandations pour une zone de stockage Lean	47
6.3.1	Management visuel	47
6.3.2	Disposition	47
6.3.3	Inventaire	48
6.4	Algorithme d'optimisation	49
6.5	CASE STUDY : Plateforme hospitalière de Melun (France)	49
6.5.1	Présentation du problème d'optimisation	49
6.5.2	Documents disponibles	51
6.5.3	Hypothèses	51
6.5.4	Données	53
6.5.5	Variables	56
6.5.6	Contraintes	57
6.5.7	Objectif d'optimisation	58
6.6	Résultats	59
6.6.1	Analyse des résultats	66
6.6.2	Discussions	69
6.7	Développement logiciel	71
6.7.1	Mode d'emploi	71
6.7.2	Implémentation et limites	72
6.8	Travail futur	72
6.8.1	Intégration de la dynamique	73
6.8.2	Intégration dans le BIM	73
6.8.3	Intégration du stockage vertical	73
6.9	Conclusion	74

7 Conclusion	75
A Visites d'entreprises	78
A.0.1 Holcim	78
A.1 IKEA	78
A.2 Puratos	80
A.2.1 CSTC	80
B Liste de solutions par type de gaspillage	82
C Débriefing des visites de chantier	87
C.1 "The One" (Valens) - Bruxelles Ville	87
C.2 "Ekla" (Besix) - Molenbeek	89
C.3 "Saint-Boniface" (Jacques Delens) - Ixelles	91
C.4 "Foestraets" (Sud Construct) - Uccle	93
C.5 "City Dox" (Besix) - Anderlecht	94
C.6 "Canal District" (Jacques Delens) - Anderlecht	96
C.7 "Jardin de l'Orne" (Besix) - Mont-Saint-Guibert	98
D Documents Plateforme hospitalière de Melun	99
D.1 Plan d'installation	100
D.2 Mode constructif	101
D.3 Métré opérationnel	103
D.4 Exemple pour calcul de temps de grue	106
D.5 Code	107
D.6 Résultats détaillés	108
E Temps unitaires de ferrailage	111

1 Introduction

Le secteur de la construction est un domaine qui de nos jours est considéré comme bien connu. En Belgique, cette pensée est souvent (à tort) bien ancrée dans les mentalités des entrepreneurs avec comme conséquence directe qu'une dynamique de routine se met en place et que très peu de place est laissé à la remise en question, à l'innovation et/ou à la recherche d'une meilleure productivité. Ce dernier point nous a particulièrement intéressé et sera à la base de l'étude contenue dans ce travail.

Comme point de départ, nous nous sommes basés sur ce que nous appellerons un constat de base : *«Au cours des vingt dernières années, la productivité du secteur de la construction avoisine les 1% par an tandis que la productivité de toute l'économie mondiale est de 2.8%. Plus frappant encore, l'industrie manufacturière bénéficie, elle, d'une augmentation moyenne de productivité de 3.6% chaque année depuis 20 ans.»* [2]

Ce constat nous a amené à nous poser plusieurs questions d'intérêt qui ont été le fil conducteur de toute notre démarche. Quels sont les facteurs et les possibles freins à l'origine de cette faible productivité du domaine de la construction ? Comment expliquer ce retard avec d'autres industries (l'automobile en particulier) ? Quelles pourraient être les pistes d'amélioration à envisager afin de combler cette différence ?

L'accent mis sur la productivité (concept qui sera défini par la suite) et son analyse qui intéresse de plus en plus les principaux acteurs du BTP (Bâtiments et Travaux Publics) peut s'expliquer par une diminution des marges bénéficiaires intervenue après la crise de 2008. Comme le montre la figure 1² [3], les marges bénéficiaires dans le domaine de la construction (en Belgique) ont fortement baissé suite à la crise ce qui a conduit les entrepreneurs à tenter d'essayer de se remettre en question sur leur mode de travail qui ne présente pas/peu de nouveautés au fil des années. Le but étant de produire plus tout en conservant des coûts d'exploitation semblables.

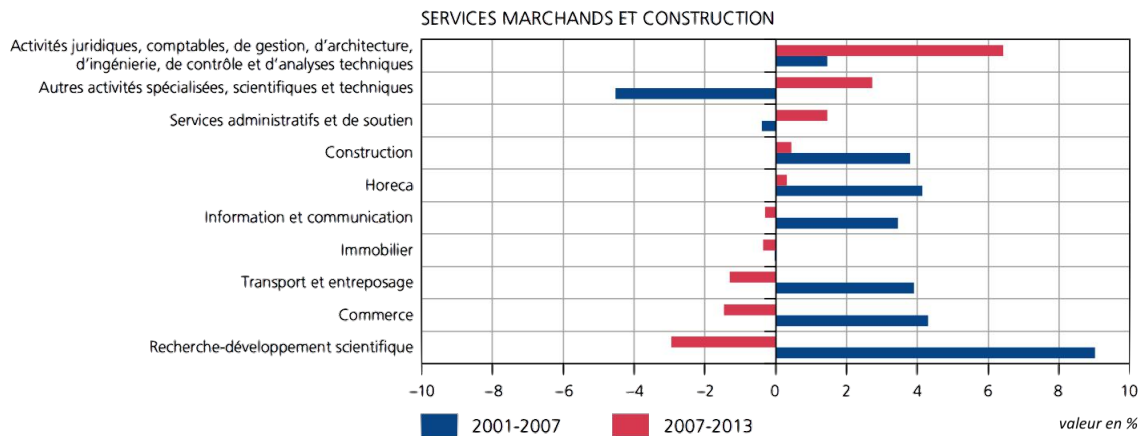


FIGURE 1 – Évolution du taux de marge brut avant et après la crise financière de 2008

Dans cette optique de recherche d'optimisation de la productivité, nous avons été amené à nous intéresser au Lean Construction. Ce terme, emprunté au secteur automobile, regroupe un ensemble de concepts que nous décrivons plus en détails dans la section consacrée au Lean en tant que tel.

C'est au travers d'une collaboration avec Besix, un des plus grands groupes belges actifs dans la construction et qui s'intéresse au Lean depuis peu, que nous avons pu entreprendre notre étude qui s'est axée sur

2. [Banque Nationale de Belgique] Marges bénéficiaires des entreprises : évolution récente dans un contexte de faible inflation

deux concepts visant à améliorer la productivité des chantiers en Belgique.

Le premier concept exploré et détaillé s'intéresse de près à la possibilité et à l'impact qu'aurait le stockage vertical sur un site de construction. A l'heure actuelle, les zones de stockage sur un chantier occupent énormément de place lorsque celle-ci est disponible. La place étant d'ailleurs un facteur limitant du stock présent sur site, il a été décidé de concentrer l'étude sur le stockage vertical des armatures. En effet, comparé à d'autres éléments, les armatures sont (à quelques rares exceptions) toujours présentes sur site et il faut dès lors prévoir une zone afin de pouvoir les stocker et les assembler par après en cages d'armatures pour poutre, colonne, voile, etc.

Les éléments étant tous stockés horizontalement, la superficie occupée est logiquement vite remplie par une quantité relativement faible d'éléments. Ce manque de place induit un second problème liée au désordre produit et qui est la perte de temps à devoir rechercher les bons éléments devant être mis en place. Le but de ce premier concept est donc double : étudier l'éventuel gain en temps et le gain en espace qu'un tel système de stockage permettrait d'obtenir.

Le deuxième concept abordé dans cette étude se concentre sur l'optimisation du placement des zones de stockage et l'impact que celui-ci peut avoir sur le planning général d'exécution d'un projet. Un algorithme a pour cela été développé. Celui-ci, prenant en compte notamment le planning, le plan d'installation de chantier, les métrés opérationnels, etc. permet ensuite de nous donner des indications fiables sur le positionnement idéal de ces zones de stockage par matériaux.

L'algorithme est finalement validée par une étude de cas. Le chantier du futur hôpital de Melun (chantier Besix) duquel nous avons pu récolter les documents et informations nécessaires fait donc l'objet d'une étude du placement des zones de stockage grâce à notre algorithme. Il pourra ainsi être déterminé si le cas réel, celui appliqué sans aide d'un algorithme renseignant le placement optimal des zones de stockages, est performant et les possibles gains qui auraient pu être obtenus si les conclusions de l'algorithme avaient pu être mis en œuvre

Finalement, un regroupement des conclusions des deux concepts est réalisé afin d'obtenir en bout de course un gain total auquel nous pourrions nous attendre si ces propositions étaient appliquées. Ce gain total serait donc pris depuis les livraisons des armatures jusqu'à leur mise en place.

Le Lean Construction aura ainsi dicté les différentes parties de ce travail en sa qualité de philosophie visant à réduire voire supprimer les tâches n'apportant pas de valeur au projet.

2 Objectifs du TFE

Dans une récente dynamique axée sur l'analyse de la performance dans le domaine de la construction et son optimisation sur chantier, de nombreux acteurs du domaine de la construction se penchent sur le concept du Lean Construction. En collaboration avec Besix, notre travail a vocation à dresser un bilan des différentes observations réalisées, de les traiter, de les interpréter et d'enfin proposer de nouvelles pistes d'améliorations afin d'augmenter l'efficacité sur site en terme de temps et de coûts.

2.1 Influences et inspirations

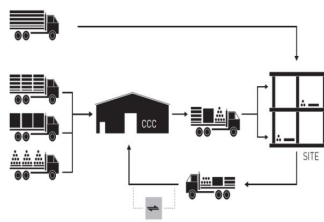
Aiguillés par le Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC) ainsi que le Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST), nous avons pris la décision de nous orienter plus spécifiquement sur le stockage des matériaux sur chantier en phase de gros oeuvre.

Le premier, un institut de recherche belge basé à Bruxelles, développe dans ce contexte l'outil «Urban-wise». Cette plateforme de mutualisation de l'information entre l'entrepreneur et leurs différents fournisseurs a pour objectif de rendre plus direct et transparent l'accès à la multitude d'informations permettant une logistique d'approvisionnement efficace.

Plans d'accès au site, horaires, coordination avec d'autres fournisseurs, etc. Les possibilités de ce service sont diverses et auront un impact déterminant sur le stockage au sein d'un chantier.



Le second projet, développé au Luxembourg, se focalise davantage sur la manière d'acheminer les matériaux sur site. Le projet SUCCESS (*Sustainable Urban Consolidation centrES for conStruction*) étudie ainsi la faisabilité d'implémenter des centres de consolidation visant à centraliser les matériaux en un seul et même endroit pour ensuite pouvoir les livrer en une seule fois sur le site.



Le but de ce projet est donc multiple : la réduction des coûts et du temps de transport, réduction du nombre de camions et donc des émissions CO_2 et l'augmentation de la flexibilité des livraisons.



2.2 Pistes proposées

Dans la continuité de ces deux projets que nous avons eu l'occasion de découvrir lors d'entretiens avec des personnes directement impliquées, il nous paraissait intéressant de traiter cette problématique

du stockage une fois les matériaux livrés, c'est à dire sur site.

Le CSTC et le LIST se concentrant sur une facette plus en amont de la notre, nous nous inscrivons parfaitement dans la suite du défi global qu'est l'apport et le stockage des matériaux sur les sites de construction.

Il est en effet flagrant de voir qu'une fois un chantier lancé, peu ou pas d'attention n'est portée au stockage des matériaux. Cette négligence entraîne bien souvent un désordre total qui nuit aux performances et amène à des délais dans le planning et/ou des coûts supplémentaires liés à la perte ou aux détériorations des éléments devant être stockés.

En vue de pallier à ce problème, une préparation du chantier et un plan d'installation du site se doivent d'être réalisés avec attention avant la phase d'exécution. Nos propositions de pistes d'amélioration interviennent donc à ce moment précis où les gestionnaires de chantier se doivent de prendre des choix arbitraires quant à la gestion de leur zone(s) de stockage. Deux pistes spécifiques ont été traitées et sont présentées dans la suite de ce travail :

1. Mise au point d'un algorithme de détermination du placement et de la superficie de la zone de stockage.
2. Etude de faisabilité organisationnelle, économique et sécuritaire d'un stockage vertical.

3 Méthodologie

La démarche de notre étude s'est articulée autour de cinq blocs qui se sont enchainés chronologiquement et qui, par soucis de clarté, sont décrits ci-dessous. Plus qu'une simple énumération des étapes suivies, le but est ici de réellement présenter les phases qui nous ont conduites à présenter nos deux pistes d'amélioration. Il nous apparait également intéressant de détailler notre démarche s'agissant d'un travail non conventionnel au sens que nous avons un point de départ dans notre étude (notre constat de base), nous avons les outils que nous souhaitions utiliser (le Lean Construction) mais pas encore de point d'arrivée.

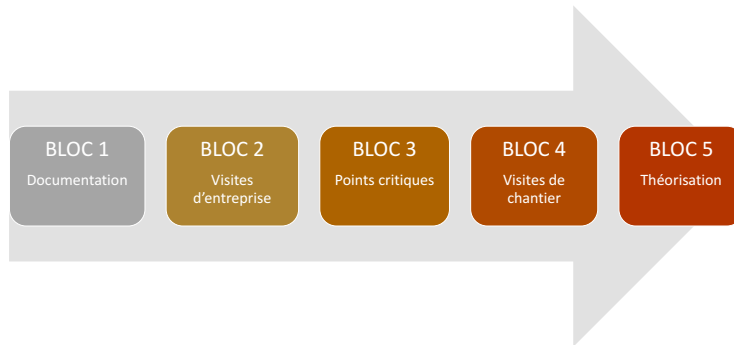


FIGURE 2 – Démarche suivie au cours de notre étude

3.1 BLOC 1 : Recherche et documentation bibliographique

La première étape pour nous lancer dans notre sujet qui a trait au Lean et à sa mise en place sur les chantiers de construction a bien sûr consisté en une recherche bibliographique sur ce sujet. Le but étant d'être innovant et créatif dans nos futures propositions, nous avons élargi nos recherches aux différentes innovations proposées dans le secteur de la construction. Au final, notre étude s'est principalement basée sur les références suivantes :

- Le Lean Appliqué à la Construction, *Patrick Dupin*
- Shaping the Future of Construction, *World Economic Forum*
- Optimization and Control in Industrial Engineering and Construction, *Honglei Xu et Xiangyu Wang*
- A BIM-based Dynamic Model for Site Material Supply, *Qunzhou Yu et Kaiman Li*
- Reinventing Construction : A Route to Higher Productivity, *McKinsey Global Institute*

3.2 BLOC 2 : Visites d'entreprise active dans d'autres secteurs

Au vu de notre constatation de base établissant l'écart entre de grands secteurs industriels et la construction dans le domaine de la productivité, il nous semblait intéressant et logique de passer par une étape d'observation. L'utilité de cette étape était réellement de prendre du recul sur notre secteur, d'essayer de nous affranchir de la logique d'un chantier et d'ainsi pouvoir s'imprégner d'idées et techniques de travail qui de toute évidence fonctionnent mieux dans d'autres industries. Nous avons ainsi pris contact avec plus de 35 entreprises susceptibles de nous intéresser. Parmi elles, relevons :

- **IKEA**, pour la qualité de leur service et pour l'impressionnante gestion de stock dont ils font preuve



- **Puratos**, pour la réactivité dont ils font preuve puisqu'ils travaillent avec des produits destinés à l'agroalimentaire et qui sont soumis à des règles strictes de températures et de temps de garde notamment.



- **Audi Brussels**, acteur incontournable dans le secteur automobile Ce secteur nous intéressait tout particulièrement puisqu'il fut celui dans lequel le Lean s'est véritablement développé pour devenir un modèle de réussite dans l'entreprise Toyota.



- **Holcim**, un des principaux cimentier en Europe et dans le monde. Il était également très intéressant et indispensable de se renseigner sur les sous-traitants actifs en phase de gros oeuvre afin d'avoir leur vision de la problématique et pouvoir se faire une idée objective des réels problèmes entraînant un manque d'efficacité sur site.



Le débriefing de ces visites est à retrouver en annexe A. Ces différents entretiens et interviews nous ont permis de nous rendre compte des défis auxquels ces industries sont confrontées en terme de coûts, de logistique et de choix stratégiques. Ces défis sont bien souvent également présent dans le domaine de la construction et il est donc fort utile de s'en inspirer.

Parmis les similitudes qui nous ont spécialement intéressées, relevons :

- **L'approvisionnement des matériaux**

1. Fréquence des livraisons

- 2. Mécanisme de passage des commandes
- 3. Horaire défini des livraisons et respect de ceux-ci
- **Le stockage des matériaux**
 - 1. Besoin de système de stockage particulier
 - 2. Stockage vertical/horizontal
 - 3. Stockage centralisé ou réparti en plusieurs zones
- **Les outils et techniques de suivi des produits**
 - 1. Utilisation de puces RFID
 - 2. Utilisation de codes barre
 - 3. Utilisation de simples étiquettes

3.3 BLOC 3 : Détermination du/des points critiques à traiter

Suite aux différentes visites que nous avons effectuées et au vu de nos connaissances acquises par notre recherche documentaire, nous avons pu élaborer une première liste reprenant des éléments à améliorer ou à repenser sur site. Les différents points, listés par type de gaspillage qu'ils occasionnent ou permettent d'éviter est à retrouver en annexe B.

L'étape suivante était de raffiner cette liste en déterminant clairement les pistes pouvant être creusées sur la durée de notre travail ainsi que celles étant les plus objectives et répondant à un réel besoin sur site. De cette liste, nous avons donc décidé de nous concentrer sur les deux points que nous traiterons plus en détails :

- 1. Mise au point d'un algorithme de détermination du placement et de la superficie de la zone de stockage.
- 2. Etude de faisabilité d'un stockage vertical.

3.4 BLOC 4 : Visites de chantiers et interviews

Nos deux objectifs déterminés, l'étape suivante consistait à aller nous rendre compte de la situation exacte sur site en y effectuant des visites de plusieurs chantiers différents et en interviewant les conducteurs. Les différents projets analysés variaient fortement en taille et en complexité ce qui nous permettait d'avoir un échantillon assez représentatif des besoins et de la possibilités de développer nos solutions. Outre les comptes rendus de nos visites se retrouvant dans l'annexe C, citons les quelques projets que nous avons pu découvrir durant notre étude :

- **The One, Valens** - Annexe C.1 -
Construction d'une tour rue de la Loi à Bruxelles réunissant un ensemble mixte de 97 appartements, 29511m² de bureaux, 160 places de parking et 850m² de commerces.
- **City Dox, Besix** - Annexe C.5 -
Projet urbain mixte (équipements, résidentiel, services intégrés aux entreprises, commerces, résidence services, maison de repos, école)

- **Ekla, Besix** - Annexe C.2 -
Réallocation d'une brasserie et d'un terrain vague en vue de la construction d'appartements résidentiels, de bureaux ainsi qu'une école maternelle et primaire.
- **Saint-Boniface, Jacques Delens** - Annexe C.3 -
Construction d'un restaurant scolaire et de salles de classe, d'une cuisine collective, des locaux techniques, un préau, un parking à vélo ainsi que les aménagements des abords.
- **Uccle, Sud Construct** - Annexe C.4 -
Construction de deux petits immeubles dans un quartier résidentiel et destinés à accueillir des appartements.
- **Canal District, Jacques Delens** - Annexe C.6 -
Projet d'un complexe de 220 habitations dans le coeur de Bruxelles.
- **Jardin de l'Orne, Besix** - Annexe C.7 -
Construction d'un nouveau quartier à Mont-Saint-Guibert regroupant une 60aine d'appartements

3.5 BLOC 5 : Théorisation des deux pistes proposées

Sur base des observations, interviews et données récoltées lors de nos différentes visites, nous nous sommes ensuite concentré sur une analyse plus théorique de nos deux pistes d'amélioration. Le but étant d'identifier de manière la plus objective et réaliste possible, les gains en temps et en espace pouvant être obtenus grâce à leur mise en place.

4 Le Lean

Cette section explique les concepts de base et l'origine de la philosophie Lean. Certains secteurs industriels sont très en avance dans l'application de ces principes tandis que la construction est en retard de 50 ans.

4.1 Les origines

La terme Lean³ a vu le jour, il y a 29 ans lorsque J.F. Krafick décrivit ce concept dans un article pour le MIT International Motor Vehicle Programme [4]. Il y expose un système de production différent de celui utilisé à l'époque : le Lean production. En effet, auparavant, les industriels de l'automobile utilisaient des "tampons(*buffers*)" pour pallier à tout imprévu pouvant survenir dans la chaîne de production : par exemple, si une machine défaillait, les autres appareils continuaient à produire. Cela engendrait un stock difficile à gérer : le but étant de ne jamais arrêter la production. Cette mentalité se décrit par le terme *Just-in Case* : continuer la production au cas-où un autre problème surviendrait et donc créer, dans l'industrie automobile, par exemple, des surfaces énormes pour parquer toutes les voitures produites. A contrario, Toyota utilisait déjà une ligne de production Lean (le Just-in-Time ou Toyota Production System) et en comparaison avec le groupe General Motors que Krafick étudiait, les Japonais étaient deux fois plus productifs en nombre de véhicules produits pour la même temps de travail avec un stock final bien moindre[4].

Le TPS (i.e. Toyota Production System) a été créé en dans les années 60 en réponse à la situation économique dans laquelle se trouvait le Japon en sortie de la Deuxième Guerre Mondiale. Taichii Ohno, ingénieur en chef chez Toyota et Eiji Toyoda, futur président du groupe, créèrent le *Just-in-Time* rebaptisé par le MIT "Lean Manufacturing" [5]. Les constructeurs automobiles analysant les performances du groupe japonais se lancèrent dans le Lean Production et l'industrie automobile ayant progressée alors de l'artisanat au Fordisme (travail à la chaîne), a évoluée vers le Lean ou TPS. Dans les sections suivantes, les causes pour lesquelles la construction est encore au stade de l'artisanat sont expliquées et la nécessité de faire évoluer le secteur vers une gestion Lean.



FIGURE 3 – L'évolution de la production de voitures depuis 50 ans. L'artisanat a laissé place à la standardisation du travail et aux lignes de production avec Ford pour ensuite se diriger vers le Lean appliqué alors chez Toyota ou encore Tesla

La figure 3 illustre l'évolution de la production d'automobile à travers le temps. Partant de l'artisanat, où la voiture était fixe et les pièces amenées et assemblées au même emplacement (ce qui ressemble à la construction d'un bâtiment) vers le Lean présent chez Toyota mais poussé à l'extrême chez Tesla avec un environnement très propre, peu de main d'œuvre humaine mais très polyvalente et bien formée et la présence de robots. En effet, 30 travailleurs expérimentés et polyvalents chez Tesla font le travail de 300

3. *maigre* en français

personnes⁴ Entre ces deux stades, il y a eu les chaînes de production et une standardisation du travail engendrée par Henri Ford où les travailleurs sont fixes et la voiture à assembler avance sur la chaîne de production.

La question à se poser est dès lors : est-ce possible de transposer cette évolution dans le secteur de la construction ?

4.2 Le concept

La philosophie de Toyota est basée sur deux piliers [5] : le *Just-in-Time* et *l'autonomation*⁵. Le premier axe se définit comme une synchronisation parfaite d'une juste quantité livrée au bon moment. Le deuxième représente une mise en autonomie d'une équipe et une automatisation des machines et des processus.

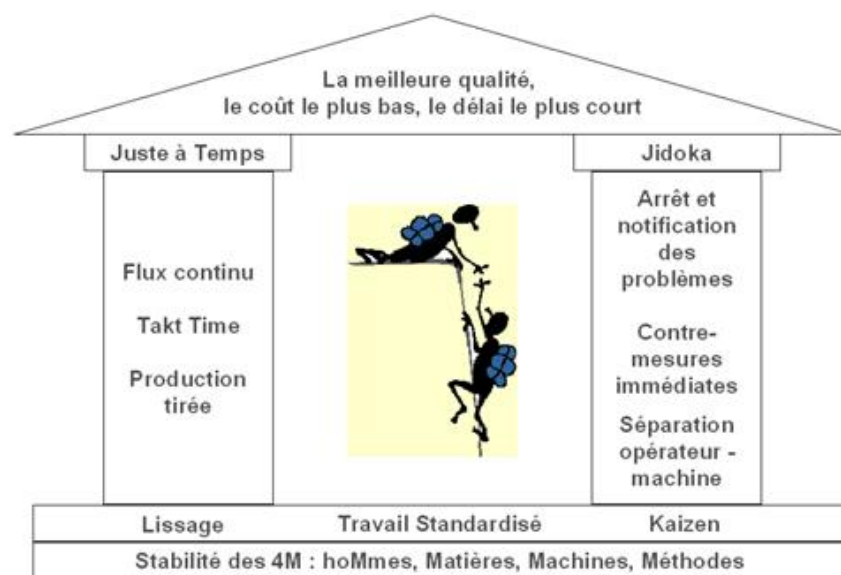


FIGURE 4 – Le Toyota Production System [1]

Il peut être observé sur l'illustration de la *maison Toyota* (cfr. Figure 4) que les deux principes cités précédemment sont les piliers de la demeure. De plus, il est important que ces deux derniers aient la même importance sinon le toit de la maison ne tiendrait pas. Ensuite, le socle est divisé en deux parties : la disponibilité (le bon produit au meilleur moment en l'améliorant continuellement (*Kaizen*)) et la stabilité (la fiabilité de la main d'œuvre, des machines et des processus). Finalement, le toit repose sur les deux piliers : il représente la satisfaction du consommateur et ses demandes. Sans toit, la maison prendrait l'eau et ne serait pas durable[1]. C'est la raison pour laquelle la philosophie Lean promouvait l'écoute, *la voix du consommateur*, ce qui permettra d'avoir une entreprise durable et rentable.

Dans leur livre, *Le système qui va changer le monde (1994)*, Womack et al., définissent cinq principes du Lean Manufacturing :

1. **La création de valeur** : ce dont pour quoi le client paye.
2. **Une connaissance de la chaîne de valeur** : connaître tous les processus qui mènent au produit demandé par le client.
3. **Maintenir le flux** : transmission d'informations constante entre tous les intervenants dans le but d'avoir un flux ininterrompu d'information et de matériels.

4. *Think big, act small. Les clés du succès d'Elon Musk* disponible sur : <http://www.usine-digitale.fr/article/think-big-act-small-les-cles-du-succes-d-elon-musk.N384359>, consulté le 5-06-2017

5. *Jidoka* terme inventé du Japonais représentant la mise en autonomie des équipes et l'automatisation des processus

4. **Tirer le flux** : la production est due à une demande préalable. Par exemple, chez Toyota, il faut un client qui enregistre une commande pour qu'une voiture soit produite, contrairement à Ford qui produisait en espérant qu'un client achète l'automobile ainsi produite.
5. **Recherche de la perfection** : éliminer les gaspillages et les défectueux. Le but est de produire moins cher, plus vite, de meilleure qualité en répondant aux demandes du client.

Ces principes ne sont possibles qu'en ayant une philosophie adaptée. En effet, comme Liker l'a souligné, six valeurs suivantes doivent être respectées pour que le Lean fonctionne [5] :

1. **L'amélioration continue** : une remise en question perpétuelle est nécessaire pour évoluer.
2. **Le respect** : respecter l'autre, c'est aussi apprendre de l'autre.
3. **Une philosophie à long terme** : ce n'est pas la rentabilité à court terme qui est recherchée mais la satisfaction des consommateurs et la rentabilité sur le long terme qui sont cherchées
4. **Un bon processus donne de bon résultats** : des processus réfléchis et analysés seront le plus performants.
5. **Ajouter de la valeur en développant les personnes et les partenaires** : la formation et l'éducation est au cœur du mouvement Lean, cela permet de développer le second pilier, l'autonomie des équipes, et le socle de la maison : leur fiabilité.
6. **Solutionner perpétuellement les problèmes** : chaque défaut même anodin doit être analysé et solutionné pour se rapprocher de la perfection opérationnelle.

La valeur est une notion essentielle pour le Lean. Il est essentiel de comprendre que cette philosophie est une aventure de durée indéterminée qui vise à atteindre la perfection dans les processus, ce qui explique son caractère d'amélioration continue : la perfection ne peut jamais être atteinte [6]. Le Lean n'est donc pas une "boîte magique" que tous les dirigeants pourraient acquérir dans le but de rendre leurs sociétés plus performantes. Chaque entreprise est différente et c'est d'abord par une analyse profonde de l'état actuel pour ensuite détecter les défaillances, entamer une réflexion avec tous les acteurs et pour finalement les corriger en respectant les principes cités précédemment que s'applique le Lean. De cette façon, l'entreprise évoluera vers une gestion plus Lean de son personnel, de ses processus et de sa communication. Simplement, le Lean est une philosophie qui vise à éliminer tous gaspillages.

4.2.1 Valeur

Dans le Lean, le client final définit la valeur d'une action ou d'une ressource. Il est donc crucial de définir quelles actions/ressources génèrent de la valeur pour le client. Cela représente un produit ou un service avec la meilleure qualité, dans les meilleurs délais et au prix le plus approprié définis par le client [7]. Par exemple, si l'analyse des activités d'un ouvrier devant peindre un mur est effectuée, l'activité à valeur ajoutée est uniquement le fait de peindre le mur. Il est dès lors logique que toute autre activité représente une tâche à non valeur ajoutée pour le client. Un autre exemple chiffré étonnant est la bouteille de Coca-Cola : seulement 3h (soit 0.04%) d'activités sont à valeur ajoutée (la mise en bouteille de la mixture) contre 330 jours à non-valeur ajoutée (transport, conditionnement, création de la bouteille, etc) ⁶. Il est donc indispensable de réduire ces activités quand elles représentent un gaspillage.

⁶. disponible sur <http://www.leandigestion.fr/wp-content/uploads/2011/08/VA-et-7-gaspillages.pdf>, consulté le 30-05-2017

4.2.2 Déchets

Muda en Japonais, représente *a fortiori* tout ce qui n'ajoute pas de valeur au produit du client. Cela représente les gaspillages qui seront répertoriés dans la sous-section 4.3.3. Il faut distinguer les activités/ressources nécessaires au fonctionnement des actions à valeur ajoutée et celles qui doivent être éliminées. L'exemple du peintre peut être analysé à nouveau : il doit préparer son matériel, préparer le mur et protéger le sol. Ces activités représentent des tâches à non valeur ajoutée. Cependant, elles sont essentielles pour que le produit final soit délivré. Il est donc primordial de distinguer ces activités qu'il faut optimiser, de celles qu'il faut supprimer comme le fait que l'ouvrier n'ait pas assez de couleur et qu'il doive retourner une nouvelle fois au magasin.

4.2.3 Productivité

Ce document réfère souvent au terme de productivité. A savoir : une mesure de la juste mobilisation des ressources pour accomplir des objectifs précis. Dans son ouvrage, Dupin la définit comme étant les outputs (biens ou services) par unité d'inputs (la main d'œuvre, les ressources, etc.) [6]. Cette productivité humaine est exprimée en devise monétaire par heure ou par employé.

4.3 Le Lean Construction

Le Lean Construction est un concept assez récent en continuelle évolution. C'est à l'université de Berkley (USA) que deux chercheurs Glenn Ballard et Greg Howell créèrent le Lean Construction Institute, une organisation sans but lucratif fondée en 1997 [6][8]. Ils se rendirent compte que l'amélioration opérationnelle sur chantier n'est pas assez étudiée et que d'importantes améliorations dans la gestion de chantier pouvaient avoir des effets considérables sur la productivité. Koskela, un autre père fondateur du Lean Construction a décrit ce concept comme une *philosophie visant à la création de valeur pour le client par élimination des gaspillages soutenue par des outils collaboratifs de gestion de projet, s'inscrivant dans le cadre d'une démarche systématique et rigoureuse d'amélioration continue*[9]. Finalement, tous les éléments du *Lean Thinking* sont repris dans cette dernière citation :

1. L'élimination des déchets
2. La collaboration
3. L'amélioration continue
4. La création de valeur pour le client

4.3.1 L'état actuel

En 50 ans, la productivité dans le secteur de la construction est restée stable ou s'est même dégradée⁷. Au contraire, dans les autres domaines industriels, cette dernière a augmentée massivement en un demi-siècle. Cela est due à une modification de la gestion, des projets mais aussi de l'avancement technologique. Actuellement, le secteur de la construction se comporte, dans sa globalité, comme le secteur automobile il y a plus de 50 ans. En effet, l'artisanat prédomine massivement le secteur engendrant un rythme de travail faible avec des coûts supérieurs [6]. Le fait que la construction n'ait pas suivi le Lean production et l'automatisation comme le secteur industriel est que ce domaine comporte quelques caractéristiques

7. The construction productivity imperative, McKinsey, disponible en ligne sur http://www.mckinsey.com/-/media/McKinsey/Industries/Capital%20Projects%20and%20Infrastructure/Our%20Insights/The%20construction%20productivity%20imperative/PNG_Construction%20productivity%20imperative_ex3_v2.ashx, consulté le 3-04-2017

qui freinent au développement et à l'implémentation de l'innovation.

4.3.2 Les particularités du domaine de la construction

Plusieurs éléments de réponse peuvent être apportés comme justification à cette résistance à l'innovation. Tout d'abord, la segmentation du secteur et sa complexité font la particularité de la construction. Cela réside dans le fait que même sur des chantiers de grande envergure, des petites PME (i.e. petites et moyennes entreprises) sont présentes et travaillent encore avec des méthodes "ancestrales". Ensuite, un chantier est régi par énormément de contrats qui définissent les responsabilités de chacun. Ces derniers ont comme effet négatif qu'un conflit s'installe entre l'entreprise générale et les autres sous-traitants sur les pénalités de retard et les responsabilités.

TABLE 1 – Comparaison de l'industrie automobile et la construction

Caractéristiques	Construction	Automobile
Standardisation du travail	Bas	Haut
Chaîne de production	Fixe	Mobile
Type de produits	Uniques - prototypes	Multiples
Type de tâches	Multiples et élémentaires	Multiples et élémentaires
Environnement	Extérieur-Changeant	Intérieur - Fixe

La table 1 exprime le fait que la principale différence entre le monde de l'automobile et celui de la construction est l'environnement de travail. En effet, dans l'industrie, le personnel est fixe et c'est le produit qui se déplace. Alors que sur un chantier, ce sont les ouvriers qui se déplacent. Cependant, même si un bâtiment est un prototype⁸, les activités réalisées se répètent, tout comme dans la production. Ces activités élémentaires (maçonner, placer des prémurs, prédalles, etc) sont donc à optimiser.

4.3.3 Les sources de gaspillages

Suivant l'ouvrage de Patrick Dupin, neuf catégories de gaspillages peuvent être identifiées :

1. La surproduction
2. Les attentes
3. La logistique
4. La sur-qualité
5. Le stockage
6. Les déplacements
7. Les défectueux
8. Le potentiel humain non utilisé
9. La débrouille

Les deux dernières catégories sont propres et importantes dans le secteur de la construction à cause de la caractéristique *artisanale* du secteur.

8. Par ce terme, il est entendu que généralement un bâtiment est réalisé une seule fois contrairement à la production de voitures de série, par exemple

1. La surproduction La surproduction se caractérise par produire alors que la production n'est pas nécessaire au moment précis. C'est un des gaspillages les plus critiques car il engendre des attentes, la perte des ressources, une augmentation du stock et donc des coûts additionnels. Il provient de la peur d'une rupture de stocks ou une mauvaise compréhension de la demande du client [10]. Selon Dupin, un baromètre intéressant de la surproduction est le volume de gravats faisant partie des déchets. Il devrait être nominal correspondant uniquement aux chutes non réutilisables, or ils sont souvent remplis de matériaux en tout genre, comme des gaines de ventilations [6].

2. Le stockage Les problèmes de stockage sont cruciaux sur les chantiers et principalement sur les chantiers urbains où chaque m^2 est compté. Généralement, un inventaire trop important peut occulter des problèmes de gestion bien plus importants : un mauvais planning, des problèmes de communication, des problèmes avec les sous-traitants, ou tous autres gaspillages dissimulés. Enfin, il est important que le stockage soit bien organisé et tenu pour éviter toute perte de temps ou de matériaux au contraire de ce qui est représenté sur la figure 5.



FIGURE 5 – Exemple de mauvais stockage sur le projet City Dox (Besix)

3. Les déplacements Le fait de stocker à des endroits distants de la zone de travail va engendrer des déplacements importants de matériel, mais aussi du personnel. Cela engendre donc un risque de dégradation du matériel s'il est mal manutentionné, de temps et de l'énergie perdue. Finalement, cela représente une partie importante des activités à non-valeur ajoutée pour le client.



FIGURE 6 – Zone de stockage sur le chantier The One (Valens) en plein cœur du quartier Européen (Bruxelles).

La figure 6 illustre une problématique importante sur les chantiers urbains : les zones de stockages. Par chance, sur ce chantier, les gestionnaires ont pu louer le terrain avoisinant le site de construction pour le stockage de cette impressionnante quantité de matériaux. Évidemment, cela engendre des déplacements plus importants des ouvriers. Pour y remédier, les entreprises générales ont loué deux manitou (i.e. chariots télescopiques roulants) qui s'occupent d'approvisionner directement le chantier et éviter ainsi les déplacements à pied.

4. Les attentes Les attentes représentent 40 % des gaspillages sur chantier [11]. Ils sont dus principalement à une mauvaise planification et coordination. Elles peuvent être dues aussi à une inspection du client ou du consultant qui n'approuve pas le travail effectué car il ne correspond pas à ce qu'il attendait ou encore une information manquante sur les plans. La figure 7 montre un chauffeur d'une bétonneuse stationnant plus de 30 minutes dans l'attente de la benne à béton de la grue qui n'était pas prête à réceptionner la livraison.



FIGURE 7 – Exemple d'attente sur City Dox

5. La logistique La logistique interne⁹ et d'approvisionnement est cruciale sur un chantier. Cela influence le respect du planning, mais aussi l'environnement autour du site de construction. De ce fait, les zones de livraison, et le circuit logistique interne doivent être clairement identifiées. Enfin, l'organisation entre les différents intervenants doit être infaillible, sinon il en résulterait des attentes importantes. La logistique doit permettre de réduire le nombre de manutentions et les éléments stockés sur un chantier. Ainsi, le *Just-in-Time* doit être promu au maximum, mais il requiert une organisation particulière avec les sous-traitants, ce qui est un point critique sur chantier. Les solutions proposés dans cette étude remédient en partie à cette problématique.

6. Sur-qualité Les gaspillages dus à la sur-qualité¹⁰ sont représentés par le coût de contrôle, des travaux réalisés non voulus par le client, des sur-effectifs ou encore des étapes inutiles dans la production. La qualité dépasse celle demandée par le client, ce qui engendre des coûts et du temps perdu. Ce gaspillage peut être réduit en effectuant une réflexion sur le compromis entre le coût de contrôle et la responsabilisation. Or, de plus en plus de chantiers en Belgique utilisent une main-d'œuvre sous-traitée dont la qualité ne cesse de baisser car le personnel n'est pas suffisamment formé, d'où la nécessité de ces frais d'inspection.

7. Les défectueux Vu que la qualité du produit est ce que le client achète au final, les défectueux représentent une source de gaspillages qui doit être totalement éliminée. Ils incarnent 10% des déchets et sont principalement dus à un défaut de qualité, des problèmes de coordination ou encore des imprécisions dans les spécifications [11].

8. Le potentiel humain non utilisé Les autres gaspillages engendrent le fait qu'un ouvrier n'est pas occupé à 100% à son travail. De fait, il peut être occupé à attendre du matériel, le transporter jusqu'à sa zone de travail, etc. Cependant, parfois, une structure hiérarchisée dans la communication interne au chantier peut engendrer aussi ce genre de gaspillage [6]. En effet, pour qu'un ouvrier agisse, il doit parfois attendre la décision de son supérieur qui lui-même patiente.

9. La débrouille Il arrive assez souvent que les ouvriers n'ont pas à disposition les outils ou les plateformes de travail nécessaires à proximité et qui, pour palier à ce manque créent eux-même ces derniers. Ils perdent donc du temps et des ressources à les construire mais de plus engendre un danger pour eux-même et les autres. La figure 8 illustre la problématique de la débrouille sur chantier. En effet, les ouvriers ont créé une table de découpe avec des éléments récupérés sur le chantier. Ceci pourrait mettre en péril leur sécurité vu que ce mobilier n'a pas été étudié à cet effet même si c'est une pratique assez courante.

9. Le plan de circulation sur le chantier définit la logistique interne au chantier. Cela représente les déplacements des ouvriers, des matériaux et des véhicules

10. une qualité supérieure à celle qui est demandée



FIGURE 8 – Exemple de débrouille sur City Dox

4.3.4 Exemple

Le projet de la clinique de Melun est un chantier où la mise en place de la philosophie Lean a été poussée au-delà du planning collaboratif¹¹. Des modes constructifs innovants, ainsi qu'une réflexion plus poussée sur l'approvisionnement a permis d'augmenter la productivité. Tout d'abord, une analyse des causes racines a été réalisée. Par exemple, la figure 9¹² démontre qu'il y a approximativement 15% du temps de mobilisation de la grue qui est à non-valeur ajoutée et donc à supprimer.

Analyse du temps d'occupation des grues

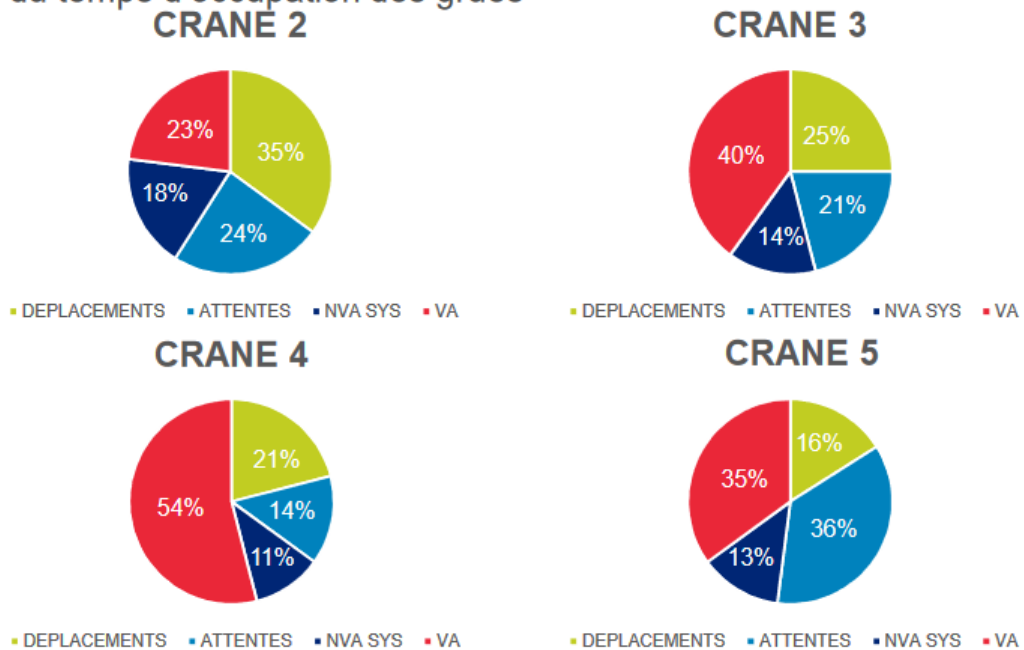


FIGURE 9 – Les différents temps d'utilisation des grues sur le chantier de Melun

11. Un exemple d'implémentation du Lean sur chantier est le Last Planner System qui est un planning collaboratif dans lequel les sous-traitants réalisent ensemble son organisation à 5 semaines à l'aide de post-it de couleurs

12. Figure venant de la deuxième conférence sur le Lean Construction, disponible sur <https://fr.slideshare.net/FlorianGayraud/2e-conference-lean-construction-france-10-mai-2016>, consulté le 1-06-2017

Finalement, un monitoring (figure 10) de l'installation des prédalles a été réalisé¹³. Après la mise en place du Lean durant quelques semaines (représentée par la flèche sur le graphique, en semaine 40), la production¹⁴ a augmentée de manière importante, ce qui démontre en partie l'efficacité du Lean lorsqu'il est correctement mis en place.

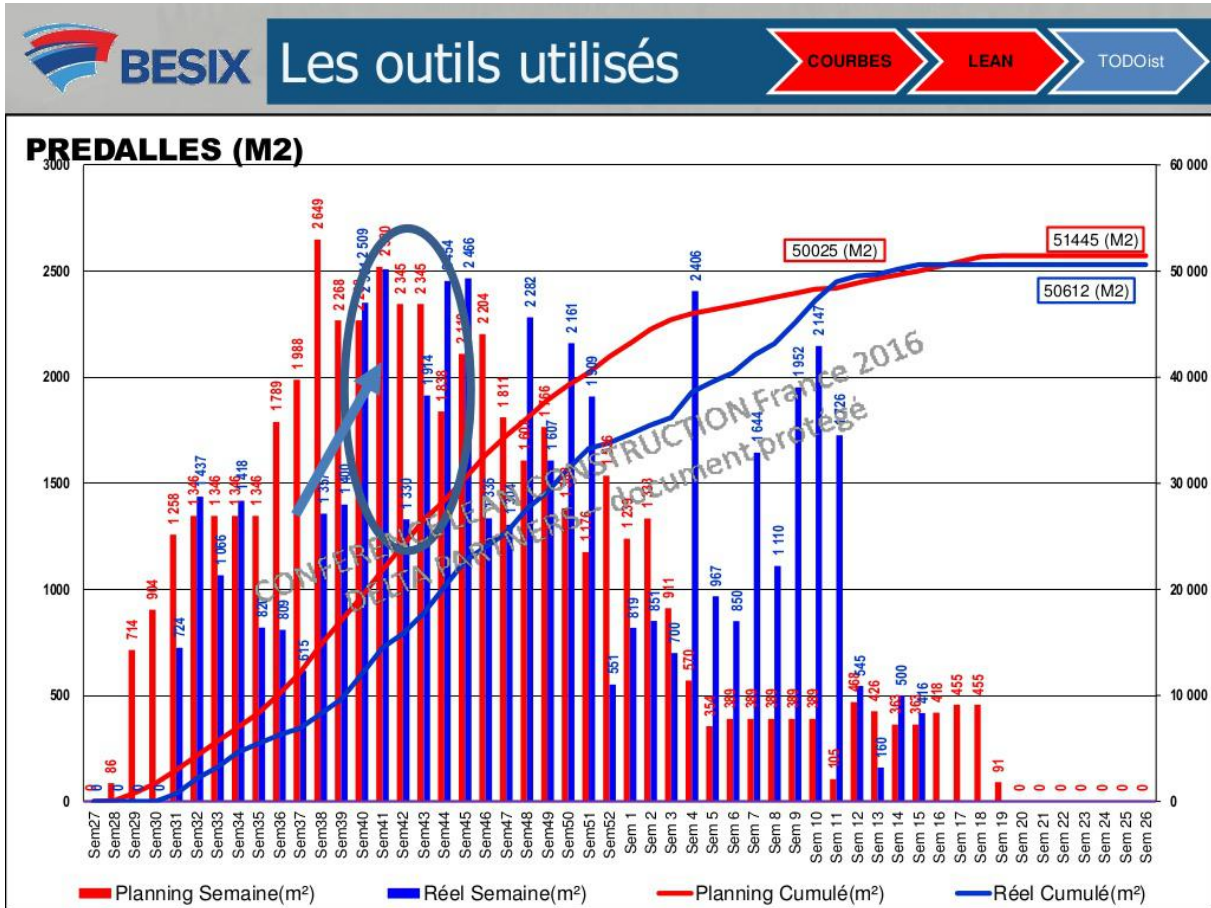


FIGURE 10 – Une augmentation de la production a été réalisée après la mise en place du Lean (planning collaboratif, ordre sur le chantier et élimination des gaspillages)

13. L'image est de faible qualité car les données n'ont pas pu être récoltées sur le chantier de Melun, le directeur de projet étant fort occupé vu que le projet est en pleine production et à 10 mois de la livraison

14. le nombre de m^2 prédalles posées par jour

5 Le stockage vertical

Deux axes de solutions sont étudiés à travers ce travail. Dans un premier temps, nous nous concentrons sur le stockage vertical afin de réduire la superficie de stockage au sol et de gagner du temps grâce à une meilleure logistique.

Dans un second temps, la disposition de ces zones de stockage sera étudiée plus en profondeur. Le but sera là d'analyser l'impact du placement des zones de stockage sur le planning d'un chantier et d'étudier la possibilité d'optimiser le placement de ces zones pour réduire le temps de déplacement des différents matériaux présents sur un site de construction.

Le Lean Construction étant focalisé sur la réduction des gaspillages en tout genre, il est assez évident qu'un grand nombre de gaspillages peut être réduit par une meilleure organisation et logistique du stockage des matériaux présents sur site.

En effet, l'éparpillement de nombreux éléments en bordure ou à l'intérieur du chantier contribue fortement à une nette baisse de l'efficacité. Il en résulte du temps perdu par les ouvriers à chercher les matériaux nécessaires, une confusion dans différents lots de livraison et donc un mélange entre les différentes commandes.

Au final, le stock censé être ordonné et conçu afin que chaque élément soit référencé pour être mis en place à un certain endroit revient à une grande quincaillerie dans laquelle on pioche ce qui est nécessaire.



FIGURE 11 – Stock d'armatures en bordure de chantier



FIGURE 12 – Exemple de désordre dans une zone de stockage

La conséquence de cette pratique est qu'outre le temps perdu à chercher ce dont on a besoin, beaucoup de matériaux sont finalement jetés car mélangés, ils ne correspondent plus à la demande initiale. Le constat théorique exposé dans la section précédente sur les gaspillages est donc vérifié.

Afin d'aller à l'encontre de cette problématique, nous pouvons nous inspirer de ce qui se fait dans d'autres industries et où une gestion du stock est beaucoup plus poussée. Une des différences assez frappante est le fait que les matériaux sont essentiellement stockés en hauteur. Ceci permet un gain non négligeable d'espace.

Dans un premier temps nous allons donc tenter de décrire les grands principes utilisés en termes de stockage et de gestion des stocks dans l'industrie manufacturière et dresser ensuite l'état des lieux des pratiques de stockage sur chantier. Nous pourrions ainsi comparer les deux modes opératoires.

5.1 Etat actuel dans l'industrie manufacturière

Concentrons nous ici sur les caractéristiques intrinsèques d'un stock dans un environnement manufacturier



FIGURE 13 – Stock type d'une entreprise manufacturière

Grâce à nos différentes visites réalisées notamment chez Ikea ainsi que Puratos, nous avons pu observer les éléments clés qui permettent le bon fonctionnement du stock dans ces entreprises.

Il est utile de relever les points suivants :

- **Stockage 3D**

Les systèmes de stockage utilisés permettent en général de stocker les éléments en les répartissant horizontalement et verticalement. Les charges peuvent aller jusqu'à $2[T]$ /étage (chaque étage étant composé de 2 europalettes).

- **Uniformisation du conditionnement**

Les éléments stockés ont en général un conditionnement homogène. Les dimensions des éléments permettent de les rassembler en une palette compacte dont les dimensions standards sont connues (1200x800[mm])

- **Environnement couvert**

Les entreprises de manufacture bénéficient souvent d'entrepôts aussi appelés magasins leur permettant de stocker les matériaux utilisés en production. Un environnement couvert rend possible le stockage d'éléments pouvant être influencés par les intempéries, les trop grandes variations de température, etc.

- **Sol plat, propice aux engins roulants**

Les systèmes de stockage vertical utilisés requièrent l'utilisation d'engins roulant permettant d'accéder/de déposer des éléments en hauteur. On retrouve des engins de type Clark¹⁵ fort adaptés à cette utilisation mais demandant un sol plat et sans obstacles.

- **Indépendance du temps**

Le stock et la zone de stockage en elle-même sont une étape clé de la production. Ils ne sont pas appelés à être fortement modifiés (taille, position, gestion) dans le temps pour un déroulement normal des activités

15. Chariot élévateur permettant la manipulation d'éléments en hauteur

5.2 Etat actuel sur chantier

La situation sur un chantier de construction est quant à elle assez différente. En opposition aux points relevés dans l'industrie manufacturière, voyons les différences observées sur un site de construction.



FIGURE 14 – Stock type sur un chantier de construction

- **Stockage 2D**

Sur un site de construction, le stockage est essentiellement horizontal. Aucun système ou aucune structure auxiliaire n'est prévue afin de pouvoir stocker les matériaux en hauteur. Ceci implique une demande en superficie relativement importante pour une quantité de matériaux stockés assez faible comparée à l'industrie manufacturière.

- **Dimensions fort différentes**

Les dimensions des éléments présents sur un chantier peuvent beaucoup varier et sont souvent très importantes (treillis soudés, panneaux de coffrage, prédalles, etc.). Il est dès lors très difficile de pouvoir standardiser leur taille et d'arriver à un système du style «europalette».

- **Plein air**

Un chantier de construction est par définition une zone en plein air. Les matériaux stockés dans une zone prévue à cet effet subissent donc les effets des intempéries. Certaines dispositions sont ainsi à prévoir comme par exemple le fait de ne pas stocker les armatures à même le sol afin de les garder propres (ni boue, ni terre) et éviter ainsi un manque d'adhérence avec le béton lorsque celles-ci sont mises en place.

- **Terrain peu/pas adapté aux engins roulants**

Là où dans l'industrie manufacturière, un sol plat et résistant est disponible, sur chantier les conditions sont moins évidentes. Comme l'illustre la figure 15 ci-dessous, les pistes peuvent rapidement se transformer en champ de boue et rendre le site inaccessible aux engins peu/pas adaptés. De ce fait, l'utilisation de «petits» engins roulants n'est pas possible.

- **Fonction de l'avancée du chantier**

De nombreux conducteurs de chantiers sont confrontés au manque de place de stockage pour les matériaux. Il en résulte qu'ils décident de stocker «là où il y a la place». Cette technique revient donc à utiliser des zones pas (encore) construites et donc à empiéter sur l'empreinte du chantier en lui-même. Les zones de stockage sont donc amenées à évoluer au cours du temps, en taille mais



FIGURE 15 – Exemple de l'état des pistes sur chantier

également en terme de placement sur le site du chantier.

5.2.1 Coûts

Plusieurs phases sont à distinguer lors de la réalisation d'un chantier. Parmi elles figurent les travaux de terrassement, les fondations, la pose des éléments structuraux (dalle, poutres, colonnes, etc.) aussi appelée phase de gros œuvre, les finitions et les parachèvements (couverture, enduits, plafonnage, carrelage, etc.) ainsi que les techniques spéciales (MEP) qui comprennent l'aération, le chauffage, la plomberie et l'électricité.

Il est donc assez intéressant, toujours dans une optique de recherche de productivité, de connaître la répartition des coûts associés à ces différentes activités.[12] Sur la figure ci-dessous, nous pouvons donc observer cette répartition regroupée en 3 grandes catégories.

1. **Le gros oeuvre**, regroupant le terrassement, les fondations ainsi que les éléments structuraux
2. **Les parachèvements**
3. **Les techniques spéciales (MEP)**

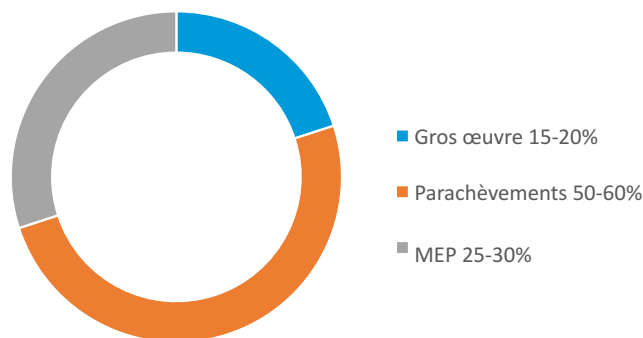


FIGURE 16 – Répartition standard des coûts pour un chantier de construction de type immeuble (*mais d'œuvre comprise*)

Ces pourcentages sont sujets à des variations plus ou moins importantes. En effet, il est évident que la réalisation d'immeubles de bureaux nécessitera moins de techniques spéciales que la construction d'un

hôtel ou d'un hôpital où leur budget est beaucoup plus important.

Nous observons donc que la partie consommatrice de la plus grande partie du budget est associée aux parachèvements, suivi des techniques spéciales et du gros œuvre

Les parachèvements font appel à beaucoup de sous-traitants et à des matériaux plus coûteux que ceux utilisés en phase de gros œuvre (acier et béton essentiellement) ce qui justifie l'importance de leur place dans le budget.

Le gros œuvre qui occupe la troisième place en terme de dépenses, justifie son impact moins important par des matériaux moins coûteux et une main d'œuvre également moins qualifiée et donc moins chère.

Les dépenses en techniques spéciales, prenant le reste du budget, se justifient par la spécificité des techniques utilisées.

5.2.2 Planning

Sur base du planning des chantiers visités, il est également intéressant de subdiviser celui-ci afin de mettre en évidence le temps consacré aux activités décrites ci-dessus à savoir le gros oeuvre ainsi que les parachèvements et MEP.

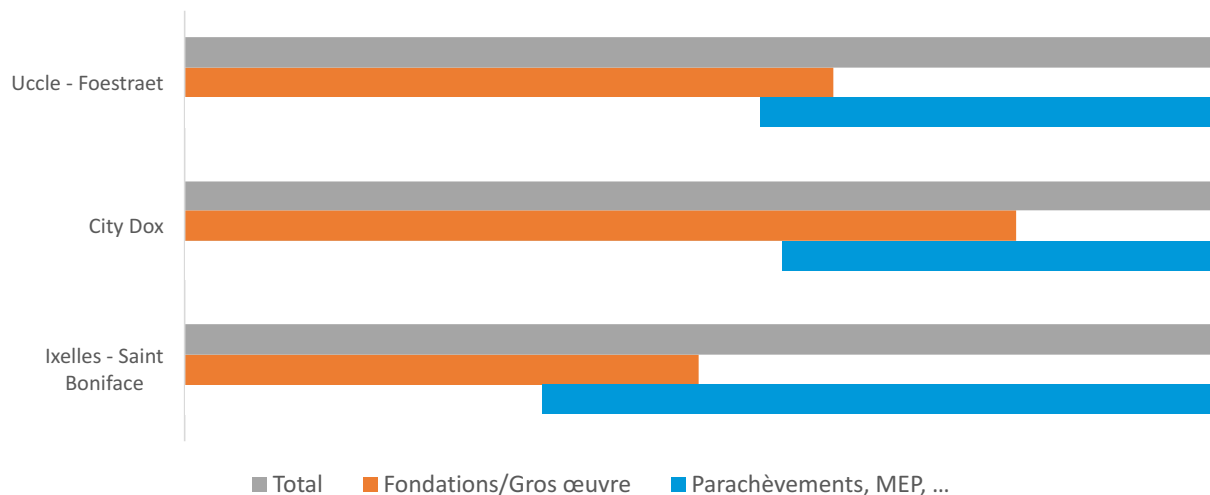


FIGURE 17 – Répartition du temps consacré aux deux phases principales de construction sur les chantiers observés

Nous observons que le temps consacré au gros œuvre occupe une partie non négligeable de la durée totale d'un chantier. Rappelons que le gros œuvre arrivait en troisième place de la répartition des coûts au sein d'un chantier.

En complément de ceci, ajoutons les observations de P. Dupin [6] qui a mesuré et décomposé le temps d'une journée passée par un ouvrier sur chantier en phase de gros œuvre Cette répartition du temps nous sera utile dans la suite du développement.

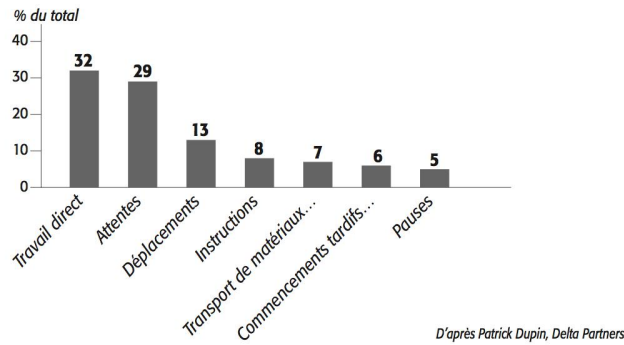


FIGURE 18 – Décomposition d’une journée de travail en phase de gros oeuvre

5.2.3 Place disponible et utilisée

La superficie réservée au stockage sur un site de construction est déterminante pour pouvoir accueillir les différentes livraisons de matériaux ne pouvant pas être directement mis en place. Avoir une place suffisante permet ainsi d’éviter les surcoûts liés à l’encombrement des voiries mais aussi de réduire le temps de manutention des éléments éventuellement stockés provisoirement à des endroits obligeant leur déplacement à court terme faute de zone prédéfinie pour du stockage.

Au niveau de l’espace disponible et utilisé, nos trois chantiers d’intérêt reflètent des situations différentes et représentatives des cas possibles ;

1. Le premier, Saint-Boniface, est un chantier d’extension d’une école en plein quartier résidentiel. Ce quartier est composé de maisons mitoyennes et les rues sont assez étroites ce qui complique l’accès des gros convois. N’ayant pas de grande superficie à disposition, le stockage se limite donc aux armatures sous forme de barres filantes et de barres coupées façonnées
2. City Dox est un chantier en périphérie urbaine. Cette situation présente l’avantage de pouvoir offrir beaucoup de place de stockage. Malgré cet avantage, la section suivante détaillera les problèmes auxquels ces chantiers sont confrontés en terme de stockage.
3. Enfin, le chantier Foestraets est un chantier dans un quartier résidentiel moins dense que celui de Saint-Boniface. Plus de place est disponible et nous nous retrouvons dans une situation intermédiaire aux deux précédentes.

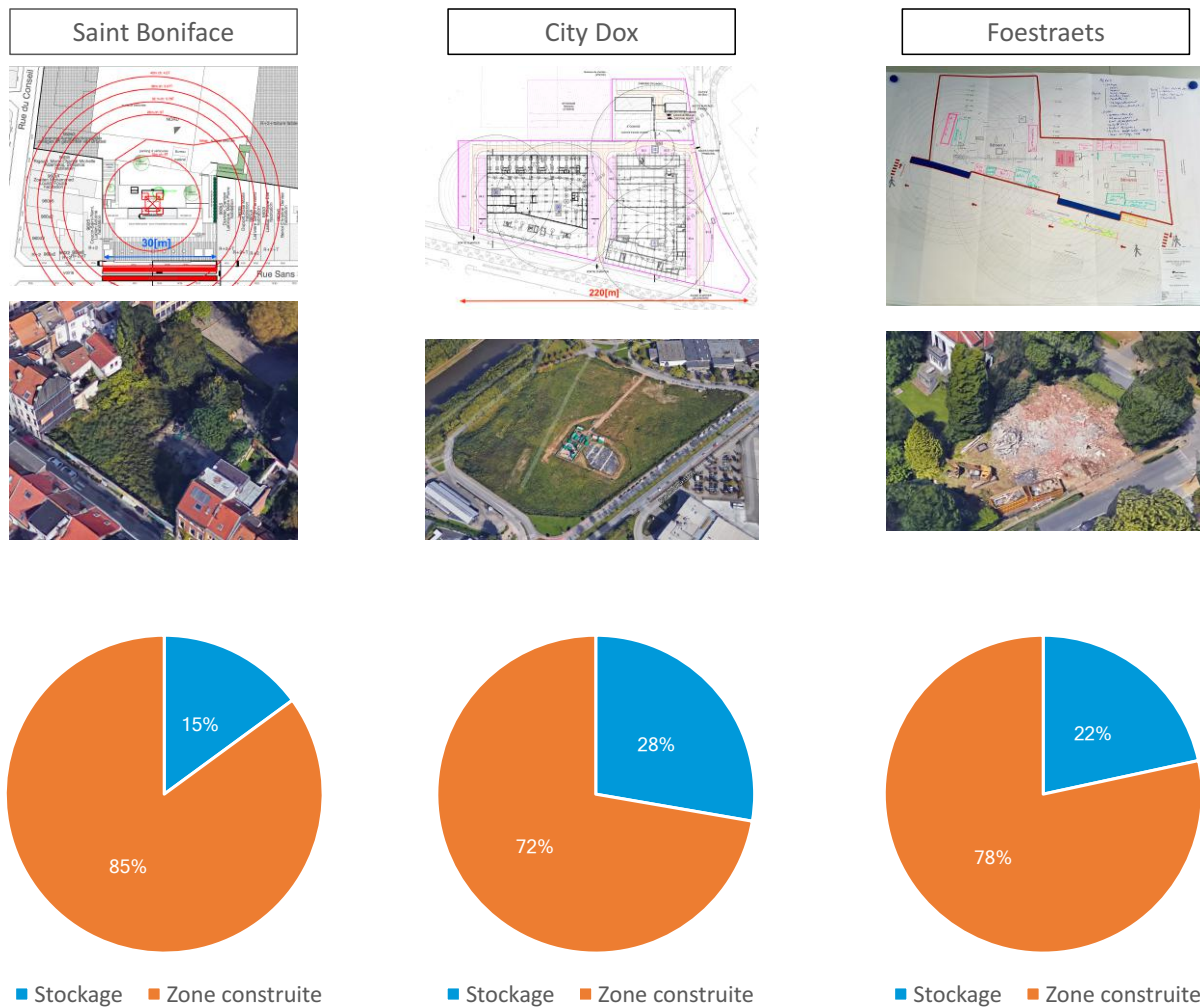


FIGURE 19 – Répartition de l'espace utilisé sur les chantiers observés

5.3 Constats et concentration sur le ferrailage

Au vu de la situation dressée précédemment, plusieurs constats sont à mettre sur pied et nous aident à orienter notre solution de stockage vertical sur un besoin bien précis :

1. Le budget alloué aux différentes activités est difficilement modifiable pour la phase de gros œuvre. En effet, pour le parachèvement et/ou les techniques spéciales, le catalogue des techniques et des matériaux est extrêmement large, ce qui permet des négociations ou des choix moins coûteux. En ce qui concerne le gros œuvre, les matériaux structuraux sont souvent imposés par la stabilité des calculs, ce qui laisse peu de choix quant aux coûts à prévoir. **Une optimisation du coût de gros œuvre n'est donc pas la priorité si on parle d'augmentation de performance.**
2. En mettant en rapport le coût et le planning, on s'aperçoit que le gros œuvre occupe une partie non négligeable du planning pour, au final, un budget minoritaire. Sur base du constat précédent, on serait donc tenté, afin d'augmenter la productivité et au vu des pertes constatées, d'insister sur le planning. **Une mesure efficace consisterait donc à se concentrer sur le temps perdu en phase de gros œuvre afin de réduire son impact sur le planning.**
3. Finalement, le dernier constat est qu'outre les chantiers en périphérie urbaine où la place n'est pas un élément critique, ce facteur est déterminant pour les chantiers à l'intérieur des villes. **Un**

système de stockage vertical réduirait donc la superficie au sol utilisée pour une même superficie totale de stock sur chantier.

L'accent est donc à mettre sur des mesures en phase de gros œuvre afin d'en réduire son (important) impact sur le planning. Plus spécifiquement, nous avons décidé d'axer notre développement sur le stockage des ferrailages et ce pour plusieurs raisons que nous développons plus en détail dans la section suivante.

5.4 Réponse à un besoin

L'analyse des différents chantiers observés nous a permis de dresser l'état des matériaux étant majoritairement stockés sur site. Il est logiquement apparu que peu importe la taille du chantier considéré, certains matériaux devront obligatoirement être stockés. Dans cette catégorie, nous retrouvons les panneaux de coffrage, quelques éléments préfabriqués (dépendant de la place et des livraisons) mais avant tout, les aciers prévus pour les armatures de béton armé coulé sur place. [13]

En effet, le stock d'armatures est un poste relativement important sur un chantier et un endroit déterminant pour le bon respect du timing d'un projet. Dans une démarche Lean, le but est donc de réduire le gaspillage présent dans cette activité et de se concentrer sur les activités à valeur ajoutée.

Afin de mieux mettre en évidence les avantages d'un système de stockage vertical des armatures, nous nous concentrerons sur des données récoltées sur le chantier de City Dox (Annexe C.5)

5.4.1 Problématique de la place

Le premier défi auquel les chantiers (urbains) peuvent être confrontés est évidemment le manque de place. De ce point de vue là, le stockage vertical se révèle extrêmement efficace.

La norme est, en effet, de systématiquement commander les aciers pour un étage complet.[14]. Cette pratique permet de réduire le nombre de livraisons, de remplir une ou plusieurs remorque(s) de camion (en fonction de la quantité) et d'ainsi réduire les frais de transport.

Une fois livrées, les armatures qui se présentent sous forme de barres filantes, de treillis soudés ainsi que de barres façonnées (en U, en cornière, étriers, etc.) doivent être stockées. C'est à cette étape que peu voire aucune attention n'est portée à la façon d'organiser le stock intelligemment, les conducteurs voulant avancer vite préfèrent ainsi déposer les matériaux où la place le permet.

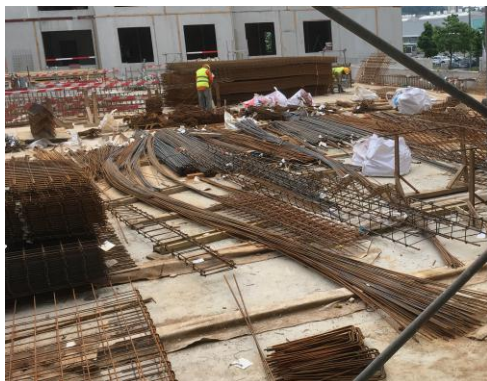


FIGURE 20 – Les éléments sont stockés les uns sur les autres faute de place



FIGURE 21 – Autre exemple d'un manque de place forçant le désordre

5.4.2 Problématique du Just-in-Time et du sur-stock

Deux modes de fonctionnement différents sont possibles pour le stockage sur site en fonction de l'espace disponible. Chaque méthode présente des atouts mais également des inconvénients que nous tentons de solutionner grâce à l'adoption d'un stockage vertical.

Prenons d'abord le cas d'un chantier urbain où peu d'espace est disponible. Le cas du chantier de Saint-Boniface (Annexe C.3) en est bien représentatif. Pour rappel, seulement 15% de l'espace total du site est destiné au stockage de matériaux (Figure 19)

Le manque d'espace de stockage pousse à privilégier le Just-in-Time [15]. Dans ce mode de fonctionnement, le stock est minimisé au profit d'une mise en place directe des matériaux sur chantier. Le meilleur exemple du Just-in-Time serait la livraison, le déchargement et la pose des blocs de silico-calcaire. Ces éléments, livrés sur palettes peuvent être directement déposés en quantité adéquate sur la dalle où le mur doit être monté.

Cette pratique, bien qu'idéale en théorie puisqu'elle réduit considérablement le temps de manutention des matériaux et donc de main d'œuvre, présente néanmoins quelques lacunes :

- Les villes étant fort congestionnées, le Just-in-Time augmenterait encore la circulation de camions aux abords des chantiers. En effet, pour que cette technique soit efficace, les quantités livrées doivent être relativement restreintes mais délivrées plus fréquemment afin, justement, de ne pas devoir utiliser de zone de stockage.
- Un timing de livraison précis doit être mis en place pour ne pas se retrouver dans la situation où deux camions arrivent simultanément ce qui imposerait la mise en stand by d'un des deux et donc un retard lié à des coûts. Ce problème est notamment traité par le CSTC grâce à son outil «Urbanwise».
- Certains matériaux ne s'y prêtent tout simplement pas. C'est malheureusement le cas des armatures devant être assemblées sur site. L'assemblage des ferrailages restant encore très rare car elle présente un surcoût considérable.

Le cas d'un chantier plus dégagé comme celui de City Dox où 28% de l'espace est consacré au stockage est bien différent. Nous avons ici, la possibilité de stocker plus que ce qui est directement nécessaire. L'avantage est qu'un certain confort est apporté par le fait de ne pas dépendre de sous-traitants et de livraisons pas toujours certaines du point de vue timing. Les matériaux sont ainsi directement disponibles. Cependant, cette méthode présente elle aussi des désavantages :

- Stocker est, dans l'absolu, une perte de temps. Tout élément se retrouvant dans une zone de stockage sera donc déplacé au moins deux fois : la première lors de son stockage et la deuxième lors de sa mise en place.



FIGURE 22 – Palette de blocs silico-calcaire déchargée directement sur chantier

- Le sur-stockage augmente la confusion entre les éléments. Un excès d'espace pousse souvent les gestionnaires à vouloir les utiliser en stockage mais comme le montre la figure ci-dessous, le sur-stockage est souvent néfaste pour la productivité. Les armatures étant malgré tout identifiées par des étiquettes (elles-mêmes liée à un plan d'exécution) celles-ci ne sont d'aucune utilité dans une foire d'acier...



FIGURE 23 – Exemple de sur-stock d'acier sur chantier



FIGURE 24 – Etiquette d'identification de lot d'armatures

Au vu de ces deux possibilités qui présentent chacune des atouts et des désavantages il est évident qu'un savant équilibre doit exister entre le Just-in-Time et le stock d'un chantier. Spécifiquement pour les armatures, où le Just-in-Time (en dehors d'armatures pré-assemblées) n'est pas applicable, il est important de choisir intelligemment les quantités à stocker afin qu'une vision claire des éléments soit possible et que les temps de recherche et d'enlèvement des éléments soient minimisés. **L'organisation de ce stock par un système de stockage vertical répond donc clairement à ce besoin et rentre dans le contexte Lean Construction associé à la réduction du gaspillage sur chantier.**

5.5 Observations et analyse des données récoltées

5.5.1 Données liées au temps

Durant nos observations, l'attention a été portée sur les activités de ferrailage. Nous avons pu ainsi prendre des mesures de temps unitaires qui ne sont habituellement pas enregistrés sur chantier. Les deux activités principales en terme de ferrailage sont l'assemblage des cages d'armatures des poutres/colonnes ainsi que l'assemblage des treillis soudés utilisés pour le renforcement des voiles. Le ferrailage des poutres et des colonnes est, du point de vue de leur assemblage, assez identique et ces deux cas seront donc analysés de la même manière.



FIGURE 25 – Réalisation de l'assemblage du ferrailage d'une poutre/colonne



FIGURE 26 – Réalisation de l'assemblage du ferrailage d'un voile

L'exercice consistait premièrement à réaliser ce qu'on appelle un value stream mapping (VSM) [16] [17] ou cartographie des chaînes de valeur afin de pouvoir identifier clairement les différentes actions que composent l'activité menée dans la zone de stockage du ferrailage. Cette cartographie est présentée ci-dessous :

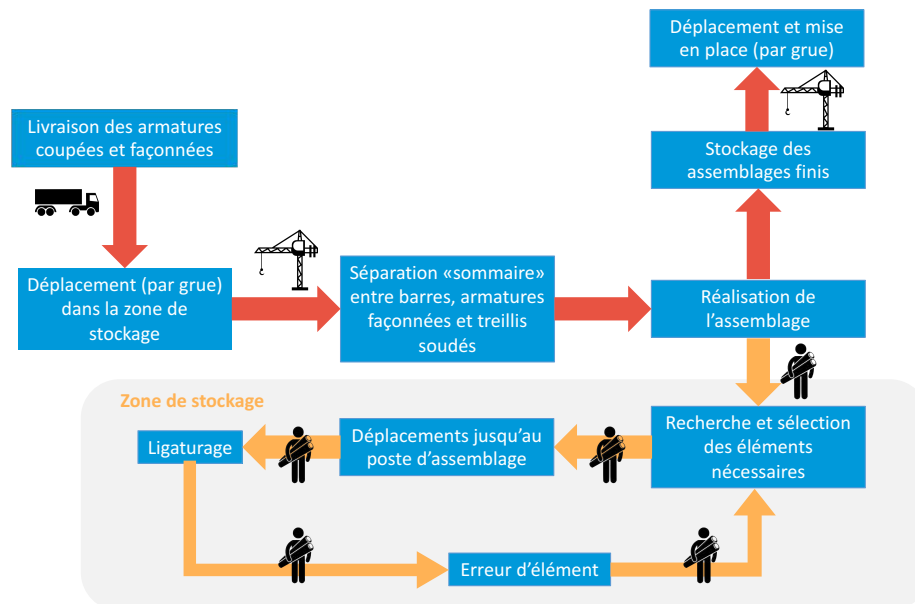


FIGURE 27 – Cartographie des chaînes de valeur du stock d'armatures

La chaîne commence par la livraison des armatures venant du fournisseur. Les différents éléments sont regroupés par types (barres droites, armatures façonnées, treillis soudés) et par plan de ferrailage. Le plan de ferrailage d'une poutre/colonne, par exemple, sera associé à un lot de barres droites ainsi qu'à un lot d'armatures façonnées

Les armatures livrées, celles-ci sont déplacées à l'aide de la grue dans la zone de stockage prévue et à cet endroit, un tri est fait de manière à séparer les lots de barres droites de ceux des armatures façonnées.

L'assemblage est décomposé en 3 parties clés. La recherche des différents éléments, les déplacements jusqu'au poste d'assemblage et finalement la ligature qui consiste à lier les éléments grâce à un fil de fer.

Les cages d'armatures assemblées sont ensuite stockées «où on peut» en attendant de venir être enlevées par la grue qui assure leur mise en place.

La première chose à observer est qu'à l'intérieur même de la zone de stockage, aucune action de grue n'est requise en dehors de l'apport des éléments par lots de livraison ainsi que l'enlèvement des assemblages finis prêts à être mis en place. Le reste des activités est exclusivement géré manuellement sans aide de machines auxiliaires de levage.

L'idée de pouvoir stocker les armatures verticalement apporte une plus value significative à l'étape de séparation des éléments, d'assemblages ainsi qu'à l'étape de stockage des assemblages terminés. En effet, énormément de temps est pour le moment perdu (et serait donc récupérable) du simple fait qu'aucune logistique systématique n'est mise en place. En structurant mieux le stock, réduisant les distances entre le poste d'assemblage et les éléments et en instaurant un schéma type à suivre, on peut, sur base d'hypothèses découlant de nos observations, imaginer dégager un gain non négligeable en temps et en superficie.

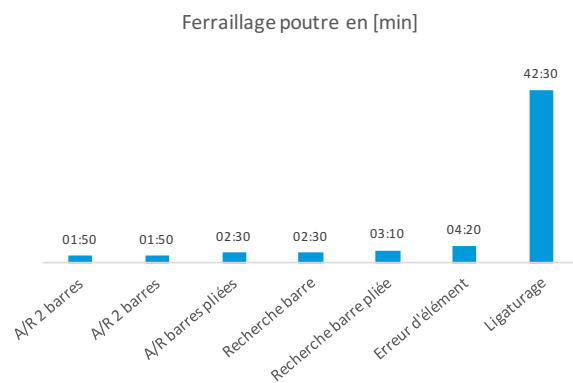


FIGURE 28 – Répartition du temps d'assemblage du ferrailage d'une poutre/colonne

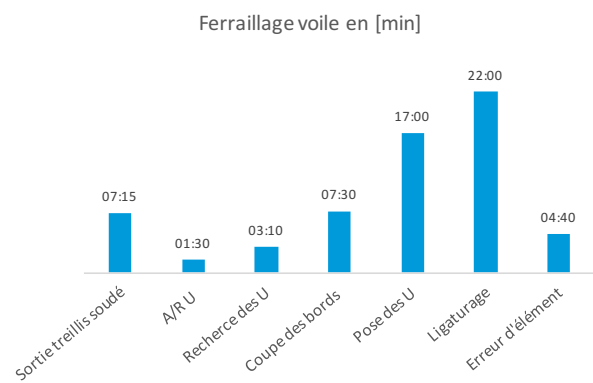


FIGURE 29 – Répartition du temps d'assemblage du ferrailage d'un voile

Les figures 28 et 29 ci-dessus décrivent les temps unitaires associés à la réalisation du ferrailage d'une poutre/colonne ainsi qu'à la réalisation du ferrailage d'un voile. Les temps de transport des éléments sont bien évidemment dépendants de la distance qui sépare le stock au poste d'assemblage mais celle-ci est généralement fort semblable partout à tel point que les valeurs présentées peuvent être considérées représentatives de la situation sur un chantier quelconque.

Les différentes activités sont séparées en deux catégories comme présentées sur les figures suivantes. La première catégorie est celle des activités à valeur ajoutée (AVA), c'est à dire les activités qui ajoutent de la valeur au « produit » devant être fini (dans ce cas-ci, le ferrailage d'une poutre/colonne ou d'un voile).

La deuxième catégorie, celle des activités sans valeur ajoutée (ASVA), correspond à des activités dont l'impact et donc le temps doit être minimisé. Cette catégorie reprend essentiellement les déplacements des ouvriers ainsi que la recherche des éléments nécessaire dans le stock.

Pour les deux activités d'assemblage analysées, on remarque donc qu'environ 25% du temps est consommé sur des activités n'apportant pas de valeur et qui sont donc considérées comme du gaspillage sur chantier. Même s'il est illusoire de vouloir les supprimer totalement, le but est alors de réduire leur importance.

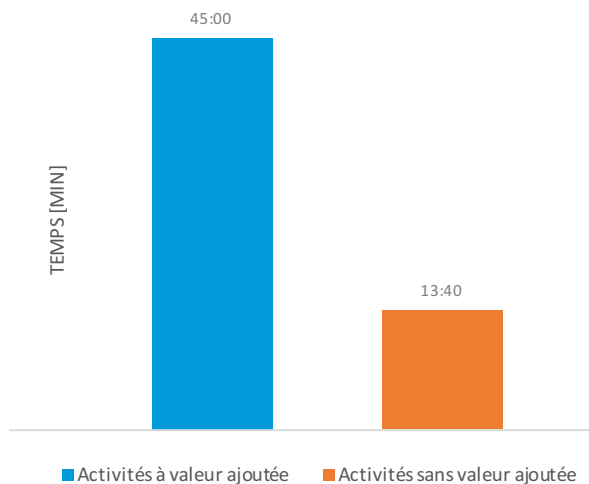


FIGURE 30 – Comparaison AVA et ASVA pour l’assemblage du ferrailage d’une poutre/colonne

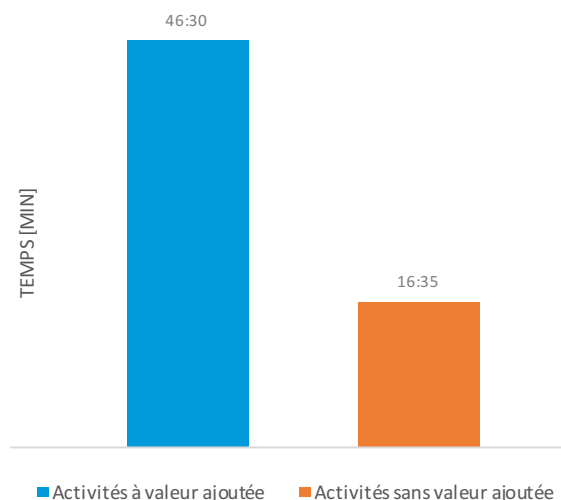


FIGURE 31 – Comparaison AVA et ASVA pour l’assemblage du ferrailage d’un voile

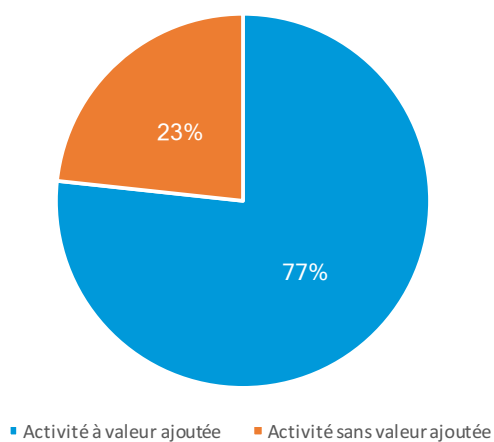


FIGURE 32 – Comparaison AVA et ASVA pour l’assemblage du ferrailage d’une poutre/colonne (pourcentage)

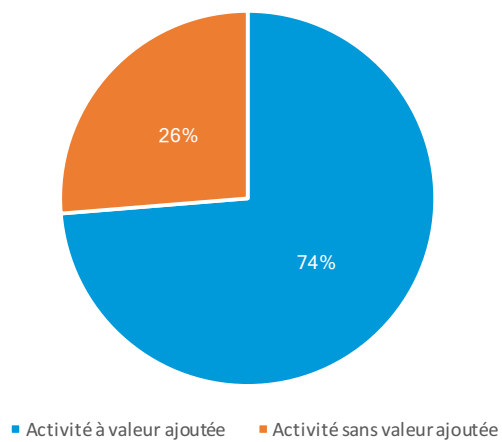


FIGURE 33 – Comparaison AVA et ASVA pour l’assemblage du ferrailage d’un voile (pourcentage)

5.5.2 Données liées à l’espace

Outre l’attention portée au temps des différentes opérations, nous avons également pu mesurer la superficie occupée par la zone de stockage des armatures. Cette zone, attribuée aux armatures, est subdivisée en différentes parties afin de séparer les barres droites des treillis soudés ainsi que des armatures façonnées.

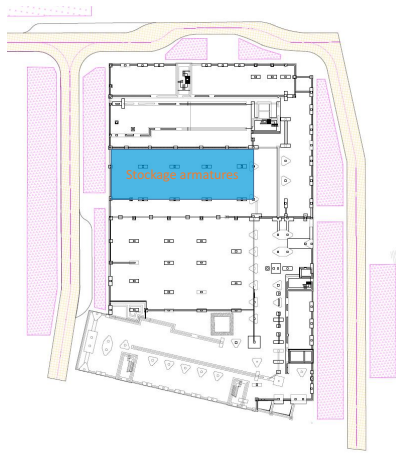


FIGURE 34 – Localisation du stockage d’armatures sur le chantier City Dox



FIGURE 35 – Aperçu du stock d’armatures sur le chantier City Dox

De manière plus détaillée, nous avons également mesuré les superficies des sous-parties liées aux différents éléments et présentées ci-dessous à la figure :

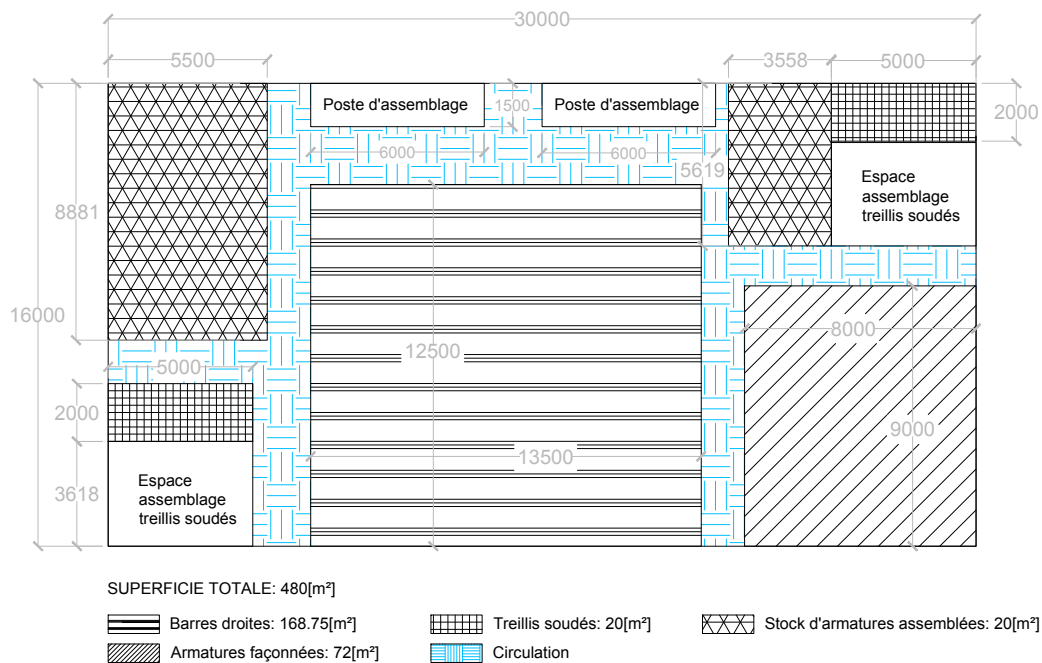


FIGURE 36 – Plan du stock d’armatures sur le chantier City Dox en situation réelle (sans optimisation par stockage vertical)

Nous observons que la majorité de l’espace est utilisée pour les barres droites. Celles-ci ne peuvent en effet que se stocker horizontalement et prennent rapidement beaucoup d’espace. De plus, comme le montrent les images précédentes, la partie consacrée aux barres droites n’est pas saturée à 100%. Une hypothèse a ainsi été prise et définit que 90% de l’espace est effectivement occupé par des barres d’acier. Ceci nous donne donc une surface assignée à ces éléments de 152[m²].

Les treillis soudés, quand à eux sont livrés empilés les uns sur les autres (voir figure 26) et occupent donc un espace moindre.

Finalement, les armatures façonnées sont livrées en lots qui permettent de les garder relativement com-

pacts jusqu'à leur utilisation ce qui explique également la plus petite surface occupée (voir figure 21). A nouveau, pour ces éléments, nous considérons une saturation de 90% de la zone ce qui nous donne une surface de 65[m²] assignée.

5.6 Cahier des charges

Dans l'optique de répondre au mieux aux besoins présents sur un site de construction et dont nous avons pu nous rendre compte au cours de nos nombreuses visites, il était important de bien définir les objectifs vers lesquels nous voulons tendre grâce à notre solution de stockage vertical rendu possible à l'aide d'une structure spécifique :

- La structure doit pouvoir supporter assez d'acier que pour réduire la surface au sol d'au moins 20% par rapport à la situation classique (c'est à dire un stockage horizontal).
- La structure doit permettre un gain significatif de temps d'exécution lié à l'assemblage des armatures.
- La structure doit permettre un chargement facile à l'aide d'une grue ainsi que de facilement et sans danger pouvoir être déchargée manuellement.
- La structure doit être capable de stocker des barres droites ainsi que des éléments pliés.

5.7 Système proposé

Le système de stockage vertical proposé est composé de trois sous-structures métalliques reliées entre elles et de trois niveaux de stockage différents de part et d'autre de la structure. Les différentes vues du système sont détaillées dans la suite aux figures 39, 40 et 41. Son agencement en escalier rend facilement possible le chargement par une grue venant déposer les différents éléments.

La structure totale est longue de 4 mètres et fait 1,5 mètre de haut afin de rendre les trois niveaux tout à fait accessible pour une personne de taille moyenne. Les deux premiers étages en partant du bas ont une profondeur de 1 mètre ce qui laisse donc la possibilité de stocker une surface de 4 mètres × 1 mètres × 2 côtés = 8[m²/étage]. Le troisième étage est partiellement chargé par les armatures façonnées et n'offre donc qu'une profondeur de 80[cm] et donc une superficie de 4 mètres × 0.7 mètres × 2 côtés = 5,76[m²]. Au total, chaque structure peut donc stocker une surface équivalente de 21,76[m²]

Les barres droites sont ainsi simplement déposées à un des six emplacements prévus (trois de chaque côté) et les caractéristiques de celles-ci sont alors clairement indiquées grâce à une étiquette apposée sur le montant de l'emplacement en question.

Le but étant de remplir chaque étage afin de rentabiliser la structure, des séparateurs peuvent également être mis en place afin de distinguer clairement deux lots différents.

Les armatures façonnées sont, elles, par contre, placées au 3^{ème} niveau à la manière de la figure 37 ci-dessous. Ce principe permet de stocker ces armatures sur la structure sans rentrer en conflit avec le stockage des barres droites.

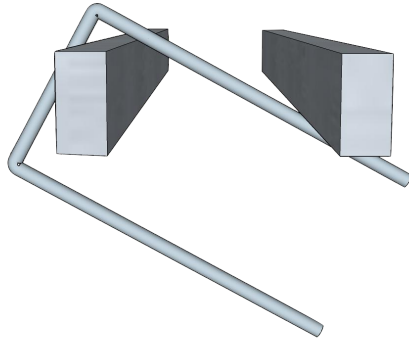


FIGURE 37 – Mode d'accrochage des armatures façonnées sur la structure

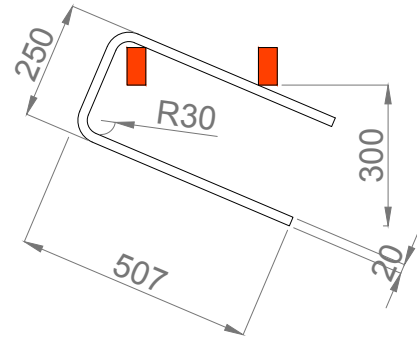


FIGURE 38 – Accroche d'armatures façonnées

L'attention n'étant pas portée sur le dimensionnement à proprement dit de cette structure, nous avons posé des hypothèses sur les dimensions de la structure afin de pouvoir nous rendre compte de la faisabilité d'une telle solution.

Nous avons donc opté pour des profilés métalliques carré de 80×80 [mm] pour les trois sous-structures portantes. Les «bras» sont composés de profilé rectangle de 40×80 [mm] et les éléments reliant les sous-structures entre elles sont des profilés cylindriques de 40 [mm] de diamètre.

Compte tenu des dimensions imposées, nous avons ainsi pu modéliser notre structure et donc vérifier sa faisabilité au vu des charges dues au stockage des armatures droites et façonnées dans les différentes parties de la structure. A noter que l'acier utilisé pour nos simulations est de type E295 et présente donc une limite d'élasticité de 295 [MPa]. Les résultats des simulations visant à vérifier la résistance sont présentés sur les figures 42 et 44. Deux cas de charges différents ont été testés. Dans le premier cas, la structure est chargée de barres de 4 [m] de long sur les trois niveaux tandis que dans le deuxième cas, des barres dépassant de 1 [m] de chaque côté sont placées sur les trois niveaux de la structure. Le même chargement dû aux armatures façonnées est appliqué aux deux cas.

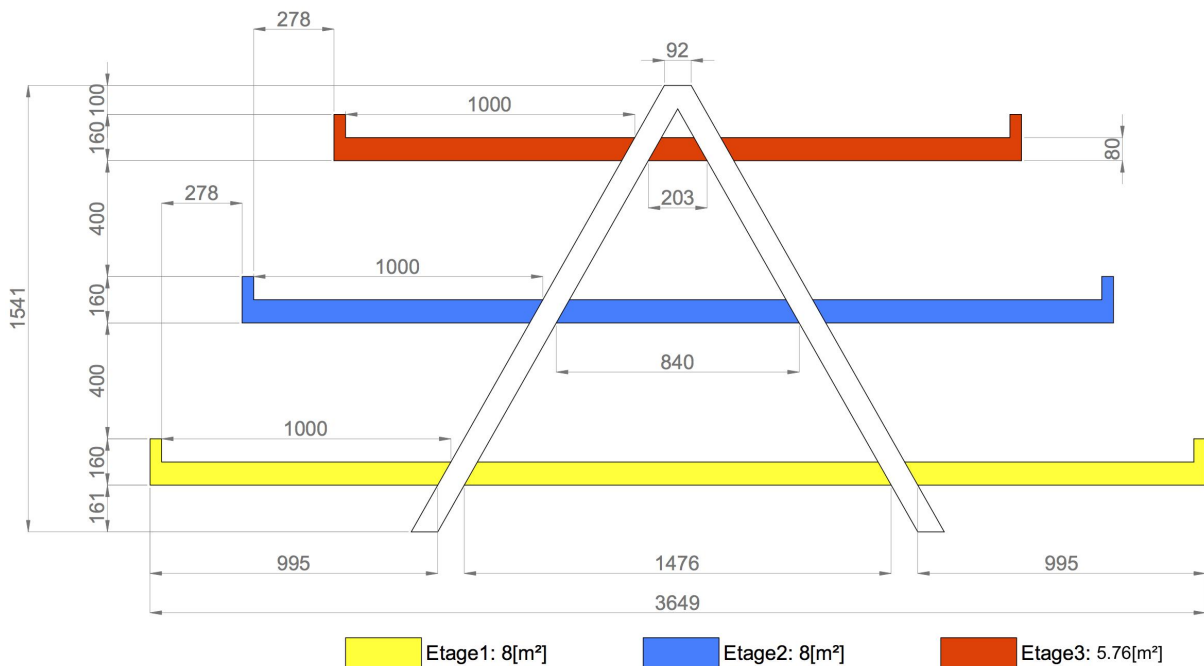


FIGURE 39 – Structure de stockage vertical d'armatures vue de côté

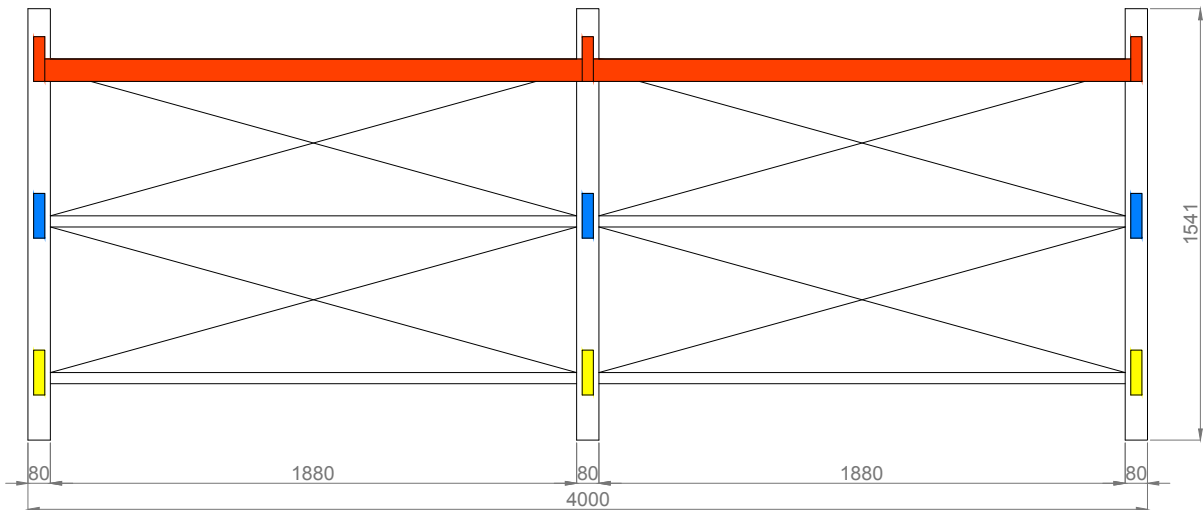


FIGURE 40 – Structure de stockage vertical d'armatures vue de face

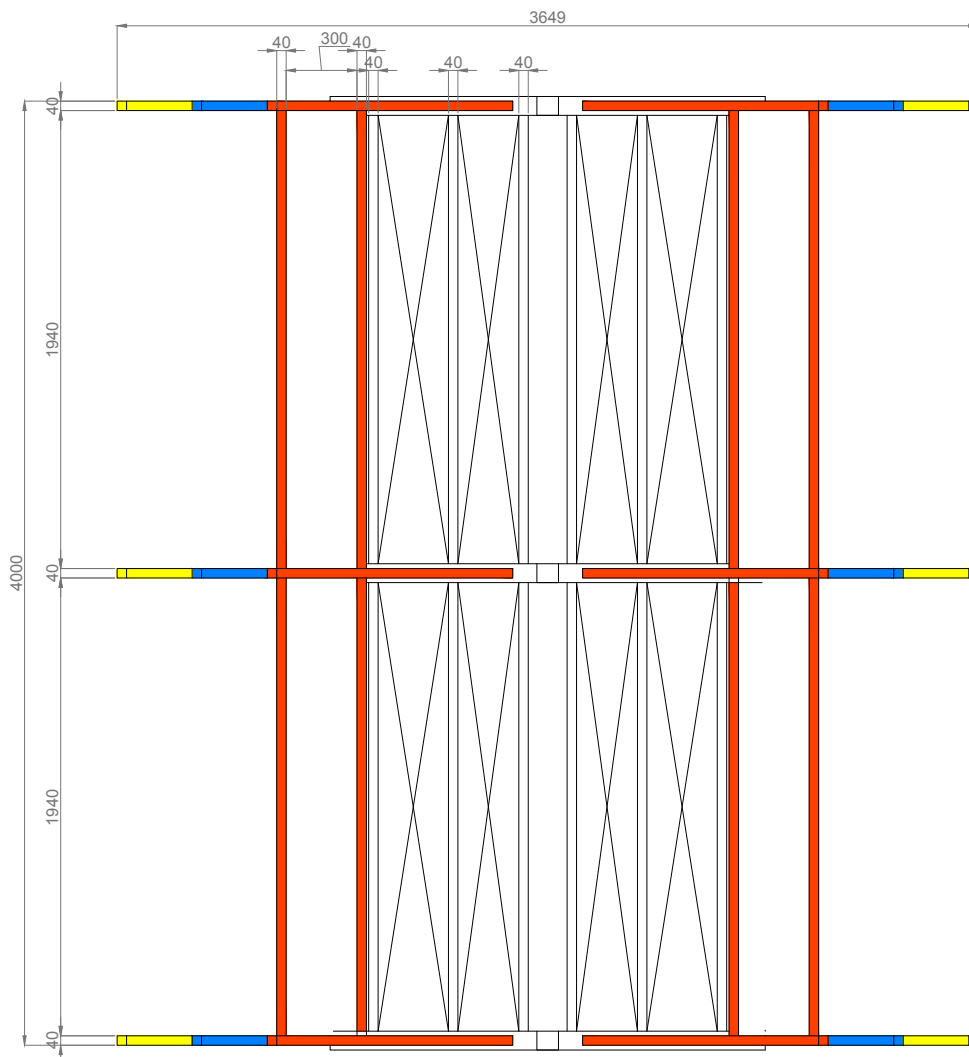


FIGURE 41 – Structure de stockage vertical d'armatures vue de haut

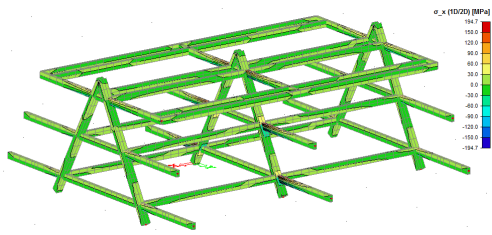


FIGURE 42 – Simulation de résistance de la structure pour des barres de 4 mètres de long

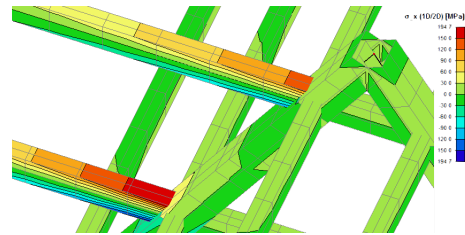


FIGURE 43 – Concentration de contraintes acceptables à la connexion bras/sous-structure

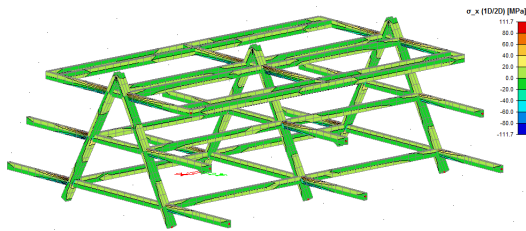


FIGURE 44 – Simulation de résistance de la structure pour des barres de 6 mètres de long

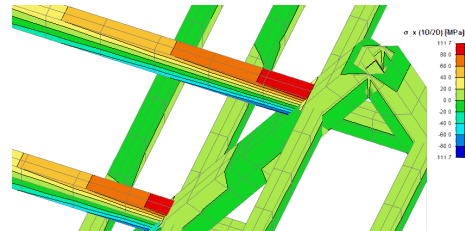


FIGURE 45 – Concentration de contraintes acceptables à la connexion bras/sous-structure

Les valeurs extrêmes des contraintes se retrouvent, pour les deux cas, dans la sous-structure centrale à la connexion bras/sous-structure comme présenté dans les figures ci-dessus. Ces valeurs maximales valent respectivement 194.7[MPa] et 111.7[MPa] pour le cas de charge reprenant des barres de 4 mètres et celui reprenant des barres de 6 mètres. Nous nous situons du côté de la sécurité. En effet, la limite d'élasticité de 295[MPa] n'est atteinte nulle part dans la structure.

Un dimensionnement plus détaillé pourrait faire l'objet d'une étude ultérieure afin d'optimiser les sections de la structure.

5.8 Gain apporté

Les différents gains apportés se basent sur différentes hypothèses théoriques. En effet, la solution du stockage vertical n'étant pas encore mise en place, aucune donnée ne peut venir confirmer nos résultats. L'objectivité de nos résultats sera donc à analyser au vu des hypothèses prises.

5.8.1 Gain temporel

Plusieurs hypothèses sur les temps unitaires ont été prises. Le résultat de celles-ci est présenté dans les figures 46 et 47.

Les hypothèses suivantes ont été prises :

- Le temps de recherche des éléments a été considéré comme celui pris par un ouvrier examinant le deuxième lot de livraison d'armatures avant de trouver celui qui l'intéresse.
- Le temps lié aux erreurs commises suite à un mauvais classement des éléments a été supprimé puisqu'on peut supposer que les éléments seront désormais correctement ordonnés et qu'aucune confusion n'est possible.

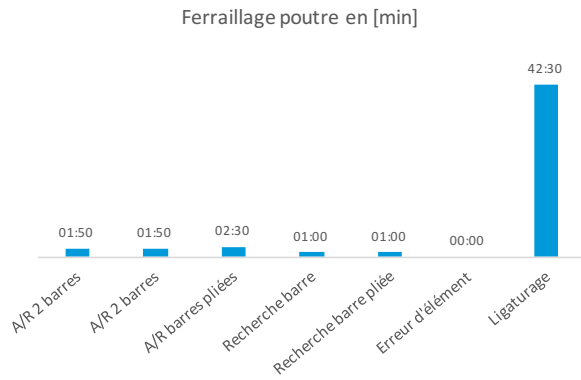


FIGURE 46 – Répartition du temps d'assemblage du ferrailage d'une poutre/colonne avec stockage vertical

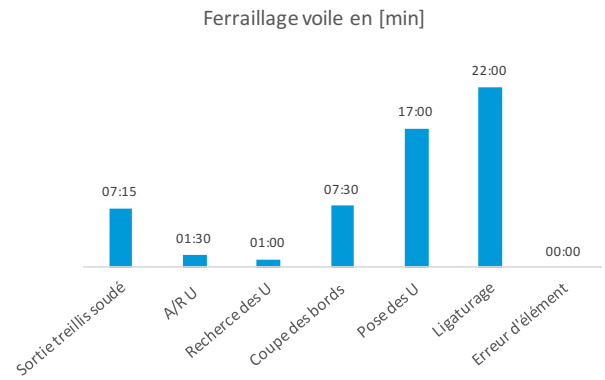


FIGURE 47 – Répartition du temps d'assemblage du ferrailage d'un voile avec stockage vertical

Cette réduction du temps global nous donne logiquement une réduction du temps des activités sans valeur ajoutée puisque ces dernières sont les seules impactées.

Nous pouvons ainsi de nouveau comparer la somme des temps des activités à valeur ajoutée avec celles sans valeur ajoutée et nous constatons désormais que les ASVA représentent 11% du temps consacré à l'assemblage du ferrailage d'une poutre/colonne et représentent 17% du temps consacré à l'assemblage du ferrailage d'un voile.

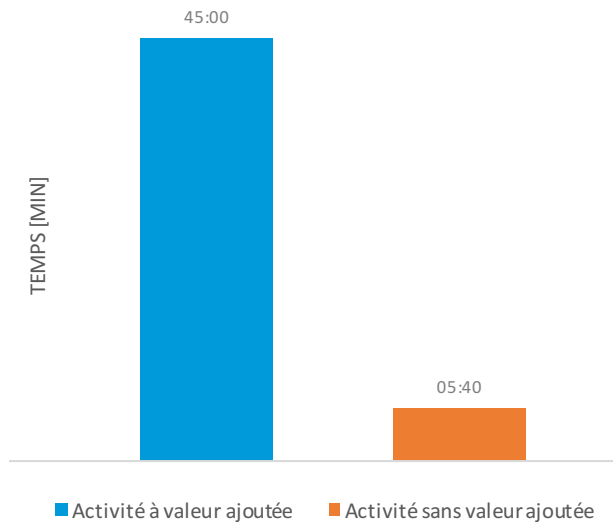


FIGURE 48 – Comparaison AVA et ASVA pour l'assemblage du ferrailage d'une poutre/colonne avec stockage vertical

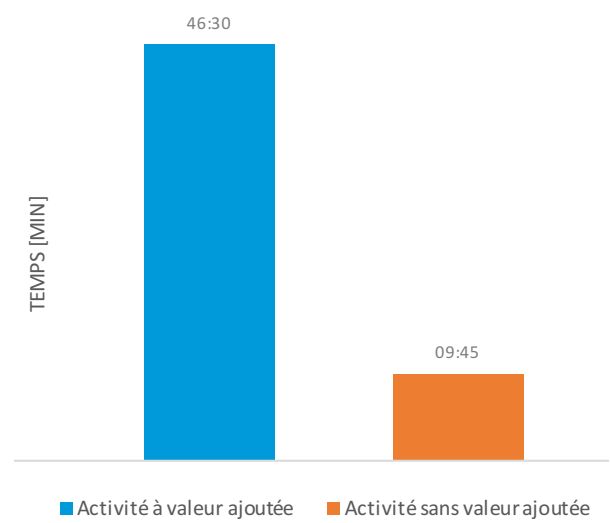


FIGURE 49 – Comparaison AVA et ASVA pour l'assemblage du ferrailage d'un voile avec stockage vertical

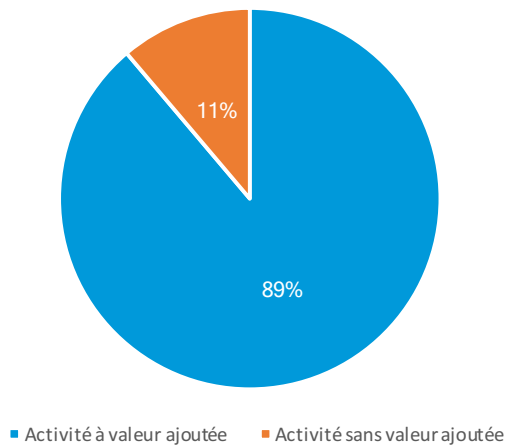


FIGURE 50 – Comparaison AVA et ASVA pour l’assemblage du ferrailage d’une poutre/colonne (pourcentage)

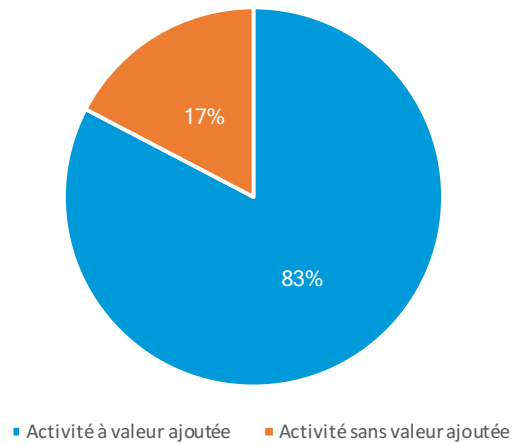


FIGURE 51 – Comparaison AVA et ASVA pour l’assemblage du ferrailage d’un voile (pourcentage)

Cette diminution du temps global peut donc se traduire par un gain total de 8 minutes pour l’assemblage du ferrailage des poutres/colonnes ainsi que d’un gain de 6 minutes et 50 secondes pour l’assemblage du ferrailage des voiles. Ceci représente un gain de 11% sur le temps total pour assemblages d’armatures d’un voile et un gain de 14% pour l’assemblage des armatures d’une poutre/colonne. Ces valeurs sont illustrées sur la figure suivante :

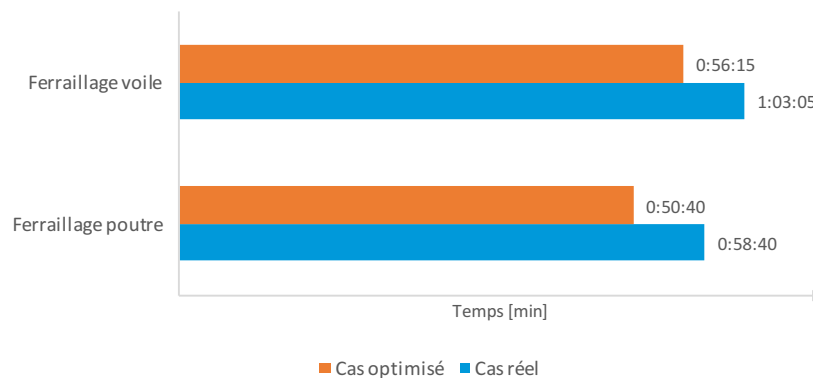


FIGURE 52 – Comparaison des temps d’assemblage entre le cas réel et le cas optimisé par stockage vertical

Remis dans un contexte global, ce gain est tout à fait appréciable puisqu’il permet d’augmenter d’une unité assemblée la production journalière. En effet, en considérant un horaire de 8 heures (480 minutes) prestées par jour pour les ouvriers, ceux-ci étaient en mesure d’assembler 7 unités de ferrailage de poutres/colonnes par jour pour un cas classique, sans stockage vertical.

En incorporant un système de stockage vertical ayant un impact sur le temps d’exécution, il est possible d’augmenter d’une unité assemblée par jour et donc de passer à 8 unités assemblées par jour.

La même démarche peut être appliquée pour le cas des ferrillages des voiles et il est ainsi possible de passer de 6 unités produites à 7. Nous détaillons le calcul de ces unités produites dans les tableaux ci-dessous :

Cas réel (sans stockage vertical)			Unités
- Temps par poutre/colonne		58,40	[min]
- Temps de battement entre 2 poutres		10	[min]
Poutres/colonnes par jour	=480/(58,40 + 10)	6,99	[U]
Cas optimisé par stockage vertical			
- Temps par poutre/colonne		50,40	[min]
- Temps de battement entre 2 poutres/colonnes		10	[min]
Poutres/colonnes par jour	=480/(50 : 40 + 10 : 00)	7,91	[U]

TABLE 2 – Assemblages des ferrillages de poutres/colonnes produits en un jour pour le cas réel et le cas optimisé par stockage vertical

Cas réel (sans stockage vertical)			Unités
- Temps par voile		63,05	[min]
- Temps de battement entre 2 voiles		10	[min]
Voiles par jour	=480/(63,05 + 10)	6,56	[U]
Cas optimisé par stockage vertical			
- Temps par voile		56,15	[min]
- Temps de battement entre 2 voiles		10	[min]
Poutres/colonnes par jour	=480/(56,15 + 10)	7,24	[U]

TABLE 3 – Assemblages des ferrillages de voiles produits en un jour pour le cas réel et le cas optimisé par stockage vertical

5.8.2 Gain d'espace

Le gain d'espace se traduit par une réduction de la superficie allouée aux barres droites ainsi qu'aux armatures façonnées. En effet, comme mentionné précédemment, chaque structure mise en place permet de stocker $21,28[\text{textrmm}^2]$ de barres droites alors que sa propre empreinte au sol est de $14,6[\text{textrmm}^2]$. Nous avons donc un rapport de $\frac{14,6}{21,76} = 0,67$ entre les deux situations. Cependant, afin de rendre possible et facile le déchargement des éléments des structures, un espace de 2[m] est à prévoir de part et d'autre de celles-ci et cette surface est donc à comprendre dans le rapport précédemment calculé.

De manière plus détaillée, observons la figure 53 ci-dessous illustrant la solution optimisée.

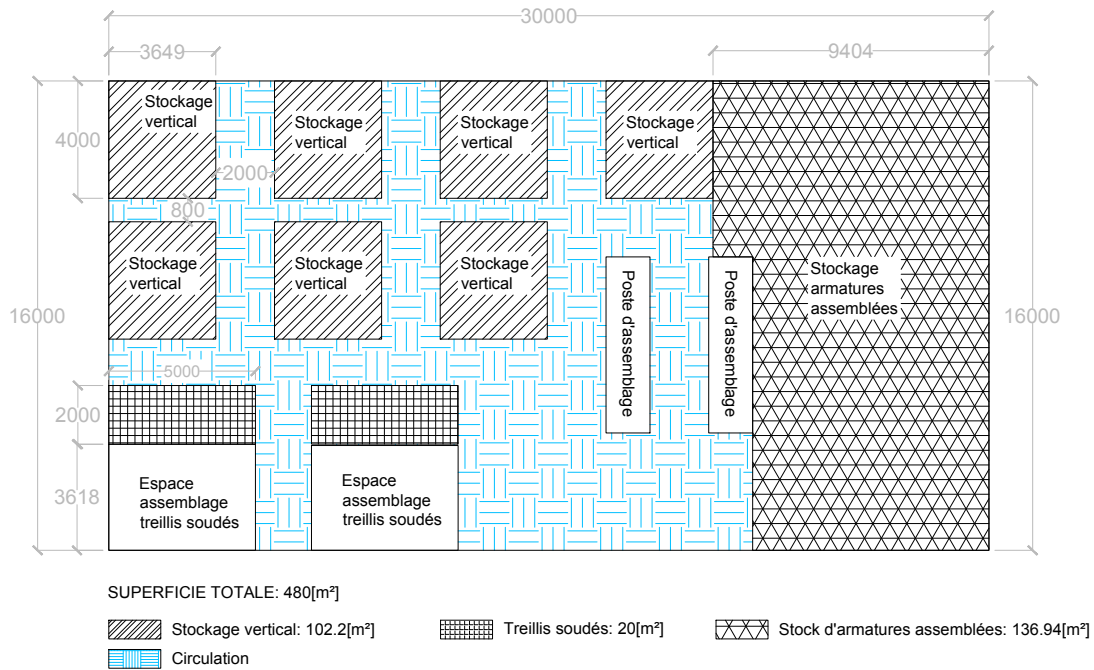


FIGURE 53 – Plan du stock d’armatures sur le chantier City Dox pour une situation optimisée par un système de stockage vertical

Remarquons tout d’abord que nous avons dû placer sept structures afin de pouvoir stocker la surface équivalente aux barres droites présente dans la zone. Nous avons initialement $152[m^2]$ de barres droites et $65[m^2]$ d’armatures façonnées. La première catégorie est déterminante sur la deuxième. En effet, les armatures façonnées occupant moins d’espace que les barres droites, les structures offriront assez d’espace pour leur stockage en ne considérant que les barres droites.

Les $152[m^2]$ à répartir dans des structures pouvant accueillir une superficie de $21,76[m^2]$ nous donne un total de 6,88, arrondi à 7 structures à prévoir. Les 7 structures et l’espace requis autour de celles-ci, nécessaire à la manutention des éléments, nous donne une surface totale utilisée de $170[m^2]$. Cette superficie, comparée à la somme des superficies des éléments stockés nous donne finalement un rapport de $\frac{170}{168,75 + 72} = 0,7$. Nous réalisons ainsi un gain d’espace de 30% par rapport à la situation réelle sans optimisation par stockage vertical

5.9 Conclusion

L’apport d’une optimisation par un système de stockage vertical a donc été étudié à travers nos différentes observations, hypothèses et analyses. La situation actuelle sur chantier a clairement été définie et nous a permis de développer notre proposition qui se traduit par un gain total double.

D’une part, nous avons pu observer qu’un gain temporel était réalisable. Celui-ci est notamment rendu possible par l’instauration d’une meilleure organisation au sein du stock qui diminue le temps perdu des activités à non valeur ajoutée. Ce gain temporel dégagé sur les assemblages des ferraillements varie selon le type d’éléments assemblés. Nous aurons un gain jusqu’à 11% sur l’assemblage du ferraillement d’un voile et jusqu’à 14% sur l’assemblage de poutres/colonnes.

D’autre part, un gain d’espace est également réalisé. En nous basant sur la situation observée sur le chantier de City Dox, nous avons ainsi pu calculer le gain de place que l’utilisation de structures de

stockage vertical pouvait offrir. Une réorganisation de la zone de stockage ainsi que la mise en place d'un système de stockage vertical nous a amené à observer un gain d'espace allant jusqu'à 30%.

6 Optimisation des zones de stockages

Comme évoqué précédemment, les zones de stockage sont un point crucial de la productivité sur chantier. A l'heure actuelle, la disposition de ses zones est définie par l'expérience du responsable du planning en charge du chantier. Il n'y a donc aucun moyen objectif pour s'assurer que le stockage a été optimisé et que la solution proposée est la meilleure. De plus, dans la plupart des projets, de nombreuses incertitudes règnent sur les livraisons et la mise en œuvre. La solution initiale est dès lors impossible à mettre en place : la tâche revient au conducteur de définir lui-même rapidement de nouvelles zones qui ne pourraient pas être optimales [18]. Au final, l'objectif n'est pas uniquement de stocker correctement, il est aussi d'approvisionner et d'évacuer efficacement : la réduction des déchets permet un gain de place substantiel. Il y a deux façons de traiter le problème du stockage :

1. En améliorant sa disposition, ce qui est étudié dans cette partie
2. En améliorant l'utilisation de la surface allouée comme il a été démontré avec le stockage vertical.

Vu que ce travail est doté d'une composante Lean, les différents principes de cette philosophie vont ensuite être appliqués dans le but de créer un algorithme avec un objectif clair et neutre, établit une proposition de disposition.

Sur les plans de chantier analysés, aucun d'entre ne tient en compte de l'évolution du chantier et que de nouveaux emplacements bénéfiques peuvent être utilisés. En effet, lorsque de multiples visites sur des chantiers bruxellois, il s'est avéré que le stockage intérieur n'était pas considéré. Par exemple, la figure 54 montre un jardin suspendu représentant une surface importante qui n'a pas été prévue à la base pour le stockage. Cela a permis d'améliorer le stockage, mais cela pourrait aussi entraîner des défauts vu que cet emplacement n'était pas destiné à la base pour accueillir un container, par exemple. De plus, des zones de stockages générales sont souvent définies sans localisation précise des éléments s'y trouvant engendrant du désordre sur le site. Ainsi, proposer des zones de stockage sensibiliserait aussi les gestionnaires et les planners à prévoir leurs évolutions à travers le temps.



FIGURE 54 – Une zone de stockage plane non répertoriée sur les plans sur le chantier de City Dox (Bruxelles)

Avant de s'intéresser à l'optimisation, des recommandations pour un stockage selon la philosophie Lean sont exposées. L'optique à retenir est donc l'élimination des déchets et du désordre, la collaboration, l'amélioration continue et l'autonomie des équipes. En outre, après les retours d'expérience sur les différentes visites, les caractéristiques d'un stock seront établies ainsi que les critères qui permettent au stockage de soutenir la productivité sur chantier.

6.1 Caractéristiques d'un stock sur chantier

Stocker mieux et moins permet de faire des économies dans plusieurs domaines. En effet, un stockage important prend de la place (il faut parfois payer des surfaces sur la voie publique), mobilise parfois un magasinier, du matériel pour délimiter et protéger le stockage, des assurances, etc. En plus de ces coûts directement imputables, il y a aussi le coût dû à la détérioration ou encore des commandes supplémentaires car l'inventaire était trop difficile à réaliser comme sur Canal District (des centaines de kg d'acier jetés car ne correspondent plus aux besoins).

En outre, d'un point de vue financier, le besoin en fonds de roulement doit être pris en considération. En effet, ce dernier n'est autre que la différence entre les actifs circulants (créances clients et stocks) et les passifs circulants (dettes). Ainsi, le stock a un impact sur la rentabilité d'une entreprise¹⁶. En conclusion, du point de vue organisationnel, c'est une nécessité de s'intéresser au problème du stockage pour en comprendre ses caractéristiques et contrôler au mieux les coûts et le désordre qu'il génère.

La section sur le stockage verticale détaille déjà les spécificités du stockage sur chantier. En bref, les caractéristiques suivantes ressortent des expériences et des visites :

1. Les matériaux
2. L'accessibilité
3. L'approvisionnement et la gestion des déchets
4. La sécurité
5. Les contrats entre entreprise générale et sous-traitants

Ces caractéristiques seront déterminantes pour la création d'un outil réaliste ancré dans la réalité. En effet, un exemple serait le fait qu'un chantier utilise principalement la grue pour déplacer ses matériaux, il faut donc qu'ils soient disposés à une distance réaliste de la grue.

La figure 55 illustre l'état de la situation entre un stockage organisé et 3D chez Ikea et le stockage de la tour The One à Bruxelles.

16. LFS A1290 – Comptabilité et Introduction aux états financiers - 2017



FIGURE 55 – Les caractéristiques d’une zone de stockage sont assez spécifiques et peuvent être observées facilement sur les deux images : horizontalité, faible *palétisation*, éléments de charges importantes, environnement non propre et faible organisation

6.2 Critères de performances

Les planificateurs établissent le planning principalement par rapport à une saturation¹⁷ de grue qu’ils essayent de maximiser. En effet, la grue rythme les journées et est la principale responsable de la productivité. Cependant, une analyse plus approfondie de l’organisation du stockage a été effectuée par des visites, des retours d’expérience et des recherches bibliographiques. Il ressort que la proximité de la zone de stockage par rapport à la grue et à la zone de demande, ainsi que l’accessibilité et la circulation interne dans le stock influencent l’utilisation de la grue et donc la saturation. En effet, comme le suggère la figure 56, la saturation dépend principalement de la disponibilité des matériaux ainsi que du temps de mobilisation de la grue par tâche. La circulation influence principalement la mobilisation : les ouvriers ainsi que la grue auront accès plus facilement aux matériaux à élinguer¹⁸. Les distances impactent les deux facteurs :

- pour que les matériaux soient disponibles, il faut qu’ils soient dans le rayon de la grue.
- s’ils sont correctement placés, ils arriveront plus vite à la zone de demande, dans le bon ordre et au bon rythme.

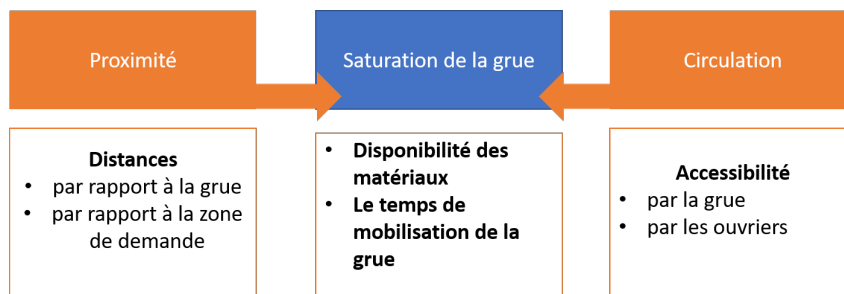


FIGURE 56 – Critères de performance d’un stock sur chantier

17. pourcentage d’utilisation de la grue sur une journée

18. attacher aux cables de la grue

6.3 Recommandations pour une zone de stockage Lean

En se basant sur des recherches sur le Lean appliqué à la construction mais aussi par les visites qui ont été effectuées notamment chez Audi ou encore Puratos, certaines pistes ont été dégagées dans le but d'améliorer la disposition interne d'une zone de stockage. Ces recommandations générales sont applicables à tous les chantiers et proviennent d'une logique de bon sens.

6.3.1 Management visuel

Le Lean définit la zone de stockage comme devant être propre, ordonnée et identifiée. Il est donc primordial que des marquages visuels soient mis en place pour éviter toute perte de temps par les ouvriers. La figure 57 illustre un bon exemple d'agencement visuel pour la circulation sur chantier. En effet, cette idée de chemin coloré organisant le flux de personnes et de matériaux n'est pas sans rappeler la disposition des magasins Ikea (cfr. partie gauche de la figure 57). Le retour d'expérience de l'assistant conducteur de chantier sur Canal District a mis en évidence le fait que ce tracé visuel a permis d'avoir un environnement plus organisé et d'augmenter la sécurité (pas d'objet pouvant blesser les ouvriers sur le chemin).



FIGURE 57 – Circulation interne organisée visuellement sur le chantier de Canal District (Bruxelles) sur la droite, inspiré notamment par l'agencement des magasins Ikea sur la gauche

Un autre management visuel encore trop peu présent est l'existence de pictogramme simple organisant le chantier. Cela permettra aisément de savoir si un matériel est à sa place ou encore de prévenir les dangers potentiels en délimitant les zones à risque. Au final, une amélioration tangible de la circulation et donc de l'accessibilité aux zones de stockage pourraient exister.

6.3.2 Disposition

Le retour d'expérience de Canal District où le Lean est appliqué a démontré aussi l'importance de responsabiliser les sous-traitants sur leur manière de stocker, surtout lorsqu'il s'agit de parachèvements et qu'ils sont dès lors nombreux. L'autonomie est un des deux piliers du Lean et est très présente avec cette organisation. La figure 58 illustre la volonté du conducteur de délimiter et d'organiser la zone de stockage par sous-traitants.

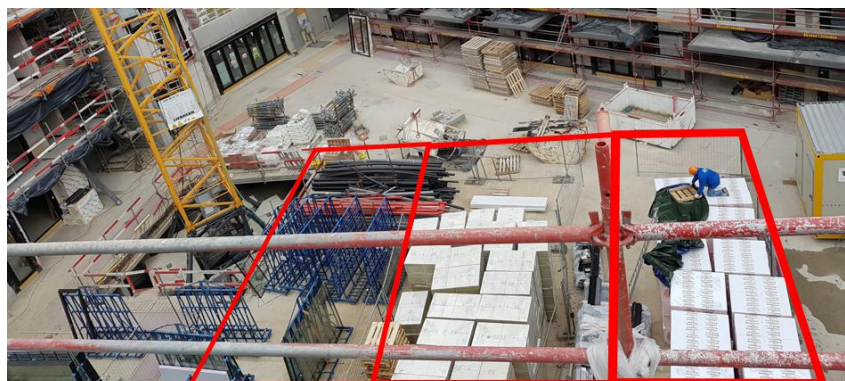


FIGURE 58 – Organisation du stockage par sous-traitant sur le chantier de Canal District (Bruxelles)

6.3.3 Inventaire

Le deuxième pilier du Lean est le Just-in-Time. Les visites ont permis de comprendre que le Just-in-Time est difficile à réaliser pour le moment. Un moyen de s'en approcher et donc de mieux contrôler les stocks, leurs surfaces et leurs dispositions est de s'intéresser à l'inventaire. Dans l'industrie, l'inventaire est automatisé et c'est dans cette direction que la construction devra se diriger avec, par exemple, l'avènement des RFID¹⁹ et des objets connectés. En attendant, une organisation minutieuse permettrait un inventaire visuel et au besoin un recensement aisé de tous les éléments stockés disposés au même endroit. Au final, optimiser les zones de stockage, ce n'est pas uniquement améliorer l'utilisation de la grue, c'est aussi organiser plus efficacement un chantier et faciliter le travail de tous.

19. puces électroniques utilisés pour le recensement et les inventaires, par exemple

6.4 Algorithme d'optimisation

Sur base de ce qui a été développé dans les sections précédentes, un algorithme a été établi avec comme objectif de définir des positions optimales pour les zones de stockage.

L'optimisation de base se fait sur la phase de préparation du chantier. Elle a pour but de définir un plan d'installation selon une séquence d'exécution précise. En effet, de nombreuses recherches et des professionnels de la construction ont reconnu que la planification des installations et *a fortiori* des stocks est une tâche critique dans l'accomplissement des critères de réussite d'un chantier. Les recherches menées par X. Ning et al., notamment reprises dans l'article *A decision-making system for construction site layout planning*[19] démontrent que pour optimiser ce processus de décision, il faut tout d'abord définir clairement les objectifs et les contraintes. Ensuite, il faut définir les caractéristiques des composantes à être placées sur le chantier et l'espace disponible qui varie tout au long du chantier. Enfin, il faut générer des alternatives au plan d'installation et évaluer leur pertinence, selon les critères de performances. Les résultats de leurs études ont montré une réduction du coût de manutention de 16,1 à 27,2%.

L'algorithme est étudié sur un cas réel : la plateforme hospitalière de Melun dont Besix France est un des principaux intervenants. Le programme a été conçu autour de ce projet, mais peut être aisément adapté à d'autres projets simples ou moyennant quelques pré-requis en programmation Matlab.

6.5 CASE STUDY : Plateforme hospitalière de Melun (France)

Ce nouveau complexe hospitalier de plus de 56 000 m^2 comportera 510 lits et un atrium de 4 étages amenant la lumière extérieure dans le cœur du bâtiment. Exemple d'application du Lean construction en Europe, le projet est repris dans de nombreuses présentations abordant ce sujet. Dès lors, l'optimisation des zones de stockage à l'aide d'un algorithme sera amplement justifiée s'il peut démontrer une plus-value sur ce chantier déjà amélioré.

6.5.1 Présentation du problème d'optimisation

Pour simplifier la situation, une seule séquence d'exécution a été choisie dans une zone définie. Des recherches ultérieures devraient donc être menées pour pouvoir affirmer complètement les résultats obtenus. La séquence choisie est l'exécution du niveau R+1 du gros œuvre du bâtiment A et B1 couvert tous les deux par la grue à tour G7 (plan d'installation disponible en annexes). La réalisation se déroule entre septembre et octobre 2016 (délai de 36 jours ouvrables sur les 259 jours de gros œuvre).



FIGURE 59 – Plateforme hospitalière de Melun en construction. Ce projet ambitionne de démontrer l'amélioration opérationnelle avec l'application du Lean Construction.

Les documents disponibles pour l'hôpital sont le métré opérationnel détaillé par étage, le planning ainsi que le plan d'installation (ces documents sont disponibles en annexe D pour la zone spécifiée et la séquence choisie). La figure 60 expose le plan d'installation. La grue G7 (en vert) a une flèche maximale de 65 m et peut porter à cette distance une charge de 3,5 tonnes. La surface couverte par le bâtiment A est 30% de la surface totale constructible (en bleu) par la grue. De plus, la grue ne livre que jusqu'aux premiers atrium supérieurs. Les remblais de terre sont représentés en jaune et gris, ainsi que les zones de stockage prévue, en mauve.

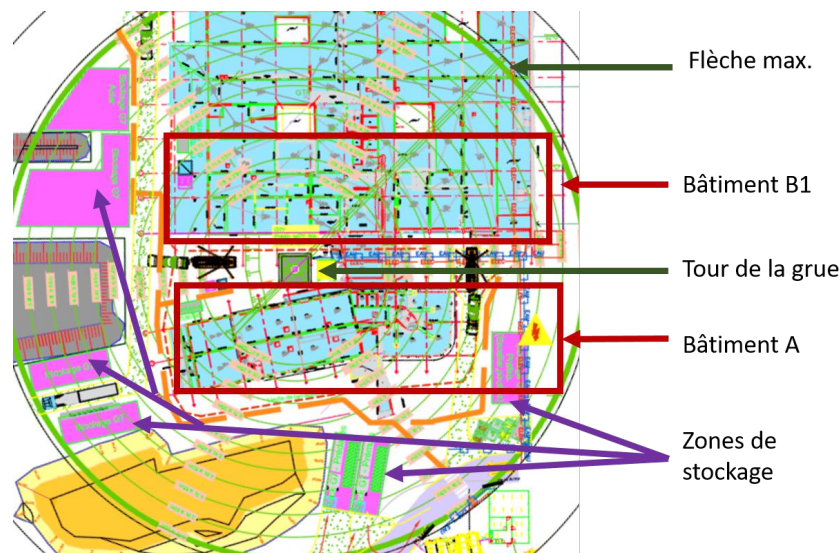


FIGURE 60 – Plateforme hospitalière de Melun zone A (bâtiment inférieur) et B1 qui seront étudiées.

Les différentes zones de stockages doivent être placées dans le rayon giratoire de la grue. Elles ont été établies en séparant les matériaux selon leur type et leur destination générale (bâtiment A et B1). La dénomination précise sera définie dans la section suivante.

Cette étude s'inscrit donc dans la planification du site. D'un point de vue académique, c'est un problème assez étudié, cependant, les résultats et les conclusions sont rarement mises en application. La valeur ajoutée de cette simulation est

1. Démontrer l'importance ou non d'une telle planification sur une durée totale (souvent seulement le temps d'exécution est pris en compte et pas d'installation des éléments)
2. Utiliser une méthode simple d'algorithme facilement utilisable par d'autres utilisateurs n'ayant aucune connaissance des algorithmes.
3. La position de la grue est fixée, ainsi le programme peut être utilisé de manière dynamique (en cours d'exécution, en plus de la phase de préparation)
4. Utiliser les résultats pour démontrer la nécessité ou non d'appliquer le Lean dans la distribution des zones de stockage.

La figure 61 illustre l'algorithme utilisé. Quatre types de données sont nécessaires ainsi que quatre contraintes sont utilisées dans la conception de l'algorithme telles que reprises sur la figure 61. L'objectif étant de réduire le temps de travail de la grue pour le même nombre d'opération. Au final, réduire le temps unitaire par opération permettra donc d'en réaliser plus sur une journée et donc d'augmenter la productivité.

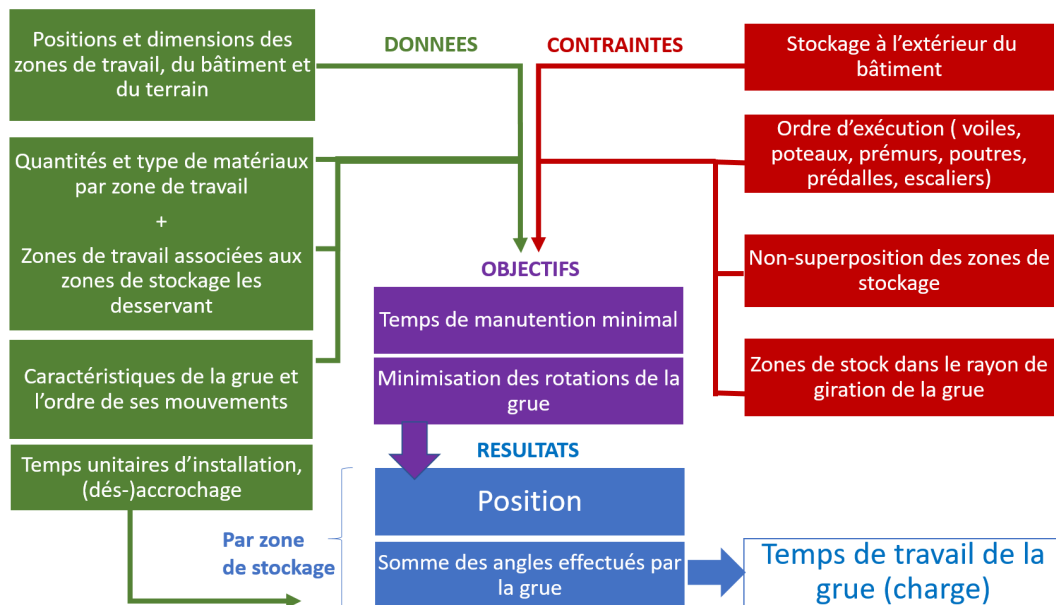


FIGURE 61 – L’algorithme détaillé dans cette partie

6.5.2 Documents disponibles

Pour pouvoir simuler ce cas d’étude, Besix a fourni les documents suivants (disponibles en annexes) :

- Le planning d’exécution
- Le métré opérationnel du R+1 ²⁰
- Le plan d’installation de la grue G7 desservant le bâtiment A et B1 ²¹
- Le plan des modes constructifs de l’étage R+1 ²²
- Une feuille de calcul pour estimer la charge de travail de la grue avec les différents temps unitaires d’installation par type d’éléments ²³

6.5.3 Hypothèses

Des hypothèses simplificatrices ont été choisies pour rendre le problème modélisable rapidement et générer rapidement des premiers résultats. Des recherches plus poussées devront être effectuées dans le but de lever certaines hypothèses. Elles seront ensuite analysées et confrontées aux résultats dans la section discussions.

· **La première concerne la dimension verticale (Z)** Considérant que la hauteur est faible (étage R+1) et que la vitesse verticale du chariot est élevée (100m/min ²⁴), la vitesse, ainsi que le déplacement verticale du matériel à placer est supérieur à la rotation dans le plan(X,Y).

· **Des simplifications géométriques ont été ajoutées** Les bâtiments sont rassemblés sous une forme rectangulaire de 60x80 m, excentrée par rapport à l’origine du plan formé par le centre de la grue. Le

20. Premier étage au dessus du Rez-de-Chaussée c’est-à-dire les verticaux de ce niveau et les horizontaux se posant sur ceux-ci

21. Les zones de stockage prévues y sont spécifiées, ainsi que les chemins de circulation, les remblais et la position des bâtiments ainsi que les dimensions

22. Ce plan illustre où sont placés les prémurs et les prédalles (leur type), les voiles, les poutres ou encore les escaliers

23. La charge représente le temps d’utilisation de la grue par journée

24. pour une vitesse moyenne d’une grue Potain MD 345 Lit

bâtiment a ensuite été découpé arbitrairement par un maillage rectangulaire de 20x20 m. Chaque maille représente une zone de placement définie par sa coordonnée à son centre (cfr. Figure 4). Comme Ning et al. soulignent dans leur article [19], modéliser correctement des surfaces non rectangulaires est un problème beaucoup plus complexe à réaliser et qui a été très peu étudié [19]. De plus, il a été décidé que c'est l'expérience du planner qui définit finalement, sur base de suggestions proposées par l'algorithme, la meilleure solution. Les surfaces des zones de stockage n'ont donc pas été modélisées, uniquement leurs positions. Ensuite, vu qu'il s'agit déjà d'un chantier assez optimisé (exemple de la mise en place et l'efficacité du Lean en Europe) certains éléments ont été retirés comme les emplacements où il y a du remblais et la circulation pour laisser plus de possibilités pour les placements des zones de stockage. Enfin, leur retrait est possible en phase de préparation : ce sont des éléments créés par les gestionnaires.



FIGURE 62 – Simplifications géométriques

TABLE 4 – Les zones de stockage à localiser

Coordonnées	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈
X(m)	-18	2	22	42	-18	2	22	42	-18	2	22	42
Y(m)	-22	-22	-22	-22	18	18	18	18	-2	-2	-2	-2

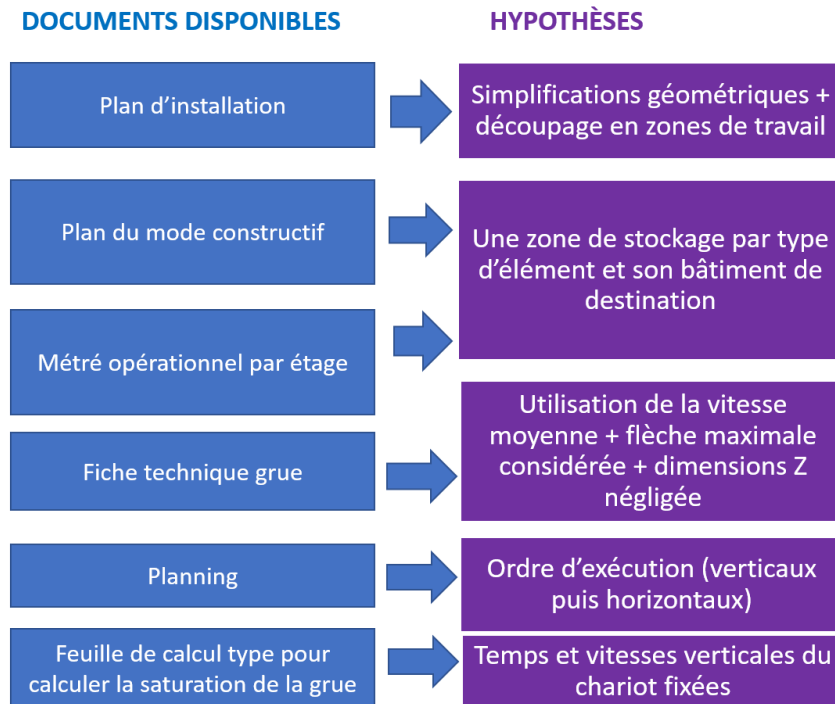


FIGURE 63 – Les documents fournis et les différentes hypothèses émises sur ces documents

6.5.4 Données

Les données du problème concernent l'emplacement des bâtiments, les coordonnées des zones de demande du matériel, la durée de la séquence de construction choisie et la vitesse radiale de la grue.

- Coordonnées Grue (0;0)
- Coordonnées Zone de demande (cfr. table 12) (X_{dj} ; Y_{dj})
- Coordonnées Bâtiments (X_b ; Y_b)
- Dimensions Bâtiments Largeur =60m et Longueur =80m
- Vitesse angulaire de la grue $\omega = 0.086 \text{ rad/s}$ ²⁵
- Durée de la séquence $t = 36$ jours

Ainsi, la position de la grue (représentant l'origine) et de la zone de placement sont définies comme fixées par le projet (la position de la grue est fixée par le plan d'installation fourni par Besix). De plus, les quantités de matériaux à déplacer peuvent être associées à leurs zones de demande comme exprimé dans le tableau 7. Cela représente soit le nombre d'unité lorsqu'il s'agit d'éléments préfabriqués, soit de coffrage à déplacer, comme pour les voiles par exemple. Dans certains cas, il faudra donc ajouter les activités de bétonnage et de ferrailage aux temps finaux obtenus à l'issue de la simulation.

La méthode de travail pour produire les données est reprise sur la figure 64. A partir des documents, certaines hypothèses ont été émises pour ensuite constituer un ensemble de données qui seront les entrées de l'algorithme.

25. pour une grue à tour Potain comme la G7

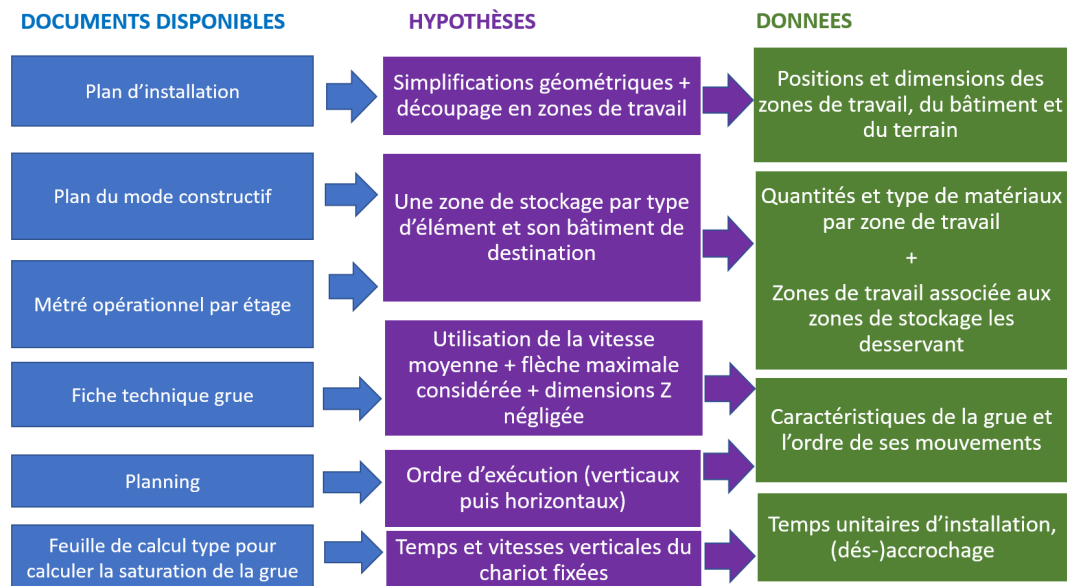


FIGURE 64 – Les documents fournis, les différentes hypothèses émises sur ces documents et les données à entrer dans l'algorithme

Pour le calcul des temps d'utilisation, Besix a fourni une base de données classique pour calculer la charge de la grue. Les caractéristiques de la grue sont reprises dans le tableau 5.

TABLE 5 – Caractéristiques de la Grue G7

Type de grue	Potain MD 345 Lit	
Hauteur Maximum de Levage	36.4	m
Capacité Max	12	tonnes
Vitesse verticale	100	m/min
Vitesse de Rotation	0.8	rot/min
vitesse radiale du chariot	100	m/min
Hauteur de travail	3.3	m

Le tableau 6 reprend les valeurs principales qui ressortent des données de Besix sur le temps d'utilisation de la grue. Évidemment, ce sont des valeurs indicatives mais qui permettent une estimation du travail de mobilisation de la grue par journée, autrement dit la charge.

TABLE 6 – Temps unitaires

Éléments	Temps d'accrochage+ d'installation+ décrochage	Unité
Voiles	0.55	min/m ²
Prémurs	14	min/u
Poteaux	5	min/u
Poutres Préfab	9	min/u
Poutres CSP	9	min/u
Prédalles	7.2	min/u
Escalier	15	min/u

Finalement, le tableau 7 est la représentation des différents mouvements que la grue devra effectués entre les zones de demande et de stockage. Ce tableau a été constitué principalement grâce au métré opérationnel et au plan les modes constructif qui stipule la position de chaque élément. Ce tableau a donc été réalisé manuellement avec les données à disposition. Toutefois, comme il est exposé dans la section discussions, un modèle BIM pourrait rendre ce travail automatique. En effet, la principale critique qui peut être associée aux données de cet algorithme est la charge de travail que requière cette association entre les zones de stockage et de demande. En effet, chaque élément sur le métré opérationnel doit être associé manuellement à un éléments sur le plan du mode constructifs (disponible en annexes), pour chaque séquence d'exécution.

TABLE 7 – Les zones de stockage à localiser et la destination de leurs matériaux

Type	Unité Total	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	Coordonnées
Voiles	3	0	0	3										$X^{Voiles,A}$ $Y^{Voiles,A}$
Voiles	19					11				8				$X^{Voiles,B}$ $Y^{Voiles,B}$
Poteaux rect.	9	3	5	1										$X^{Poteaux,A}$ $Y^{Poteaux,A}$
Poteaux rect.	11					5	1	2	3					$X^{Poteaux,B}$ $Y^{Poteaux,B}$
Poteaux circ.	5							4				1	0	$X^{PoteauxCirc,B}$ $Y^{PoteauxCirc,B}$
Prémurs	19	6	10	3										$X^{Premur,A}$ $Y^{Premur,A}$
Prémurs	25					3	4	6	3	1	3	1	4	$X^{Premur,B}$ $Y^{Premur,B}$
Poutres Précont.	8	2	3	3										$X^{PoutrePref,A}$ $Y^{PoutrePref,A}$
Poutres Précont.	19					4	5	6	4					$X^{PoutrePref,B}$ $Y^{PoutrePref,B}$
Poutres CSP ²⁶	2	2												$X^{PoutreCSP,A}$ $Y^{PoutreCSP,A}$
Poutres CSP ²⁷	11					2	2		2	1		4		$X^{PoutreCSP,B}$ $Y^{PoutreCSP,B}$
Prédalles	61	21	40											$X^{Predalles,A}$ $Y^{Predalles,A}$
Prédalles	84					18	18	16	18	3	3	3	2	$X^{Predalles,B}$ $Y^{Predalles,B}$
Escaliers	4		2	2										$X^{Escaliers,A}$ $Y^{Escaliers,A}$
Escaliers	4							2		2	3			$X^{Escaliers,B}$ $Y^{Escaliers,B}$

6.5.5 Variables

Les différentes variables régissant le problème sont : les distances qui séparent la grue, la zone de stockage et la zone de demande. De plus, une attention particulière doit être apportée au fait que la grue tourne sur elle-même et qu'il faut donc tenir compte de l'angle de rotation de la grue qui peut dans certains cas allonger significativement la distance à parcourir par le matériel. L'espacement entre l'approvisionnement et le placement est donc régi par la rotation effectuée par la grue et la différence de distance par rapport à la tour de la grue. Finalement, ce qui définit ces distances sachant que les positions des zones de demande et de la grue sont fixées n'est juste que les coordonnées²⁸ des centres des zones de stockage définies dans la section précédente.

28. *Type* : désigne le type d'éléments à stocker (prémurs, poutres, etc) et *Destination* : destination des éléments A ou B1

Variables

Coordonnées des zones de stockages ($X^{Type, Destination}$; $Y^{Type, Destination}$)

6.5.6 Contraintes

Dans tout travail d'optimisation, des contraintes doivent être prises en compte pour définir le domaine d'application de la solution. Même si le problème réel a été légèrement simplifié, trois contraintes doivent être intégrées : le rayon de giration de la grue, la non-superposition des zones de stockages et les délimitations des bâtiments.

Pour faciliter l'optimisation d'un point de vue programmation, des fonctions de poids²⁹ ont été utilisées. En effet, comme il sera explicité dans la section sur le paramètre d'optimisation, une fonction de coût³⁰ doit être minimisée. En utilisant des fonctions poids, plus la solution proposée pour les coordonnées des zones de stockage se rapproche de la contrainte, plus elle "coûte" cher et donc sera déclinée pour une solution qui sera plus éloignée des contraintes. En effet, les coordonnées des zones de stockage doivent satisfaire les contraintes décrites ci-dessous et dans le même temps minimiser la fonction objectif décrite dans la sous-section suivante.

1. Le rayon de giration de la grue La grue G7 à une flèche maximale de 65 m pour 3,5 tonnes. Il conviendra donc de vérifier les chargements admissibles pour les différentes flèches. Le plan cartésien formé est défini par son origine étant le centre de la grue (0,0). Il faut donc que le centre ($X^{Type, Destination}$; $Y^{Type, Destination}$) des zones de stockage soit dans le cercle admissible.

Domaine admissible pour une charge de 3,5 tonnes

$$(X^{Type, Destination})^2 + (Y^{Type, Destination})^2 \leq 65^2 \quad (1)$$

2. L'intersection entre plusieurs zones Pour assurer une répartition réelle des différents éléments sur le site, il faut que l'algorithme d'optimisation gère l'intersection possible entre deux zones de stockages distinctes pour conserver le stockage 2D.

Non superposition des zones

$\forall i, j$: différents types de zones de stockage :

$$X_i^{Type, Destination} \neq X_j^{Type, Destination} \ \& \ Y_i^{Type, Destination} \neq Y_j^{Type, Destination} \quad (2)$$

Pour rajouter une dose de réalité, il a été décidé que l'espace minimum entre deux points est de 5 m assurant une surface minimale aux zones de stockages.

29. outil mathématique permettant d'augmenter l'importance de certains éléments par rapport à d'autres dans une somme, par exemple. Ici, la somme des contraintes

30. c'est la fonction objectif de l'algorithme à optimiser

3. Les délimitations des bâtiments L'objectif de cet algorithme est de placer les zones en dehors des limites des bâtiments. Comme l'origine du plan est défini par le centre de la grue, les coordonnées de la zone constructible peuvent être ainsi déterminées.

Délimitation des bâtiments

$$53 < X^{Type, Destination} \text{ ou } X^{Type, Destination} < -28 \quad (3)$$

$$28 < Y^{Type, Destination} \text{ ou } Y^{Type, Destination} < -32 \quad (4)$$

6.5.7 Objectif d'optimisation

Avant de définir la fonction de coût du problème qui sera l'objectif d'optimisation, plusieurs nouvelles définitions doivent être formulées (procédure inspirée des travaux de K.Alkriz et Al.) :

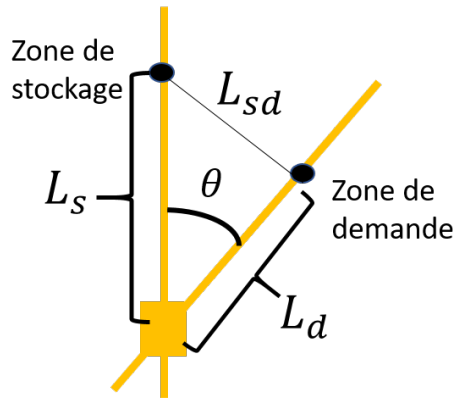


FIGURE 65 – L'angle θ est défini par la rotation de la grue (en jaune) entre la position de la zone de stockage à la zone de demande

1. Distance entre la grue et le stock

$$L_s = \sqrt{X_{stock}^2 + Y_{stock}^2} \quad (5)$$

2. Distance entre la demande et la grue

$$L_d = \sqrt{X_{demande}^2 + Y_{demande}^2} \quad (6)$$

3. Distance entre la zone de demande et le stock

$$L_{sd} = \sqrt{(X_{stock} - X_{demande})^2 + (Y_{stock} - Y_{demande})^2} \quad (7)$$

4. L'angle entre la zone de demande et le stock

$$\Theta_{sd} = \text{Arccos}\left(\frac{L_s^2 + L_d^2 - L_{sd}^2}{2L_sL_d}\right) \quad (8)$$

La somme des θ doit être calculée pour chaque type de zone de stockage.

Ainsi, la fonction de coût à minimiser est la somme des différents déplacements et donc a fortiori des angles Θ_{sd} .

La fonction de coût à optimiser est :

$$f = \min[\Sigma(\Theta_{sd})] \quad (9)$$

Le programme proposé dans le cadre de ce mémoire calcule et optimise cette fonction de coût par zone de stockage. La séquence d'exécution n'est pas prise en compte, puisque le planning et le métré quotidien ne sont pas suffisamment précis pour établir des dépendances entre les zones. Pour notre cas d'étude, les verticaux (colonnes,prémurs) seront placés avant les horizontaux (poutres, prédalles, escaliers).

Les résultats de l'optimisation seront les coordonnées des différentes zones de stockages. Les angles de rotation obtenus permettent également de calculer la saturation de la grue. Cependant, ne connaissant pas toutes les activités de la grue sur une journée, la charge de la grue concernant les éléments choisis sera calculée uniquement. La comparaison relative entre différents cas sera donc mise en évidence et permettra de formuler des conclusions.

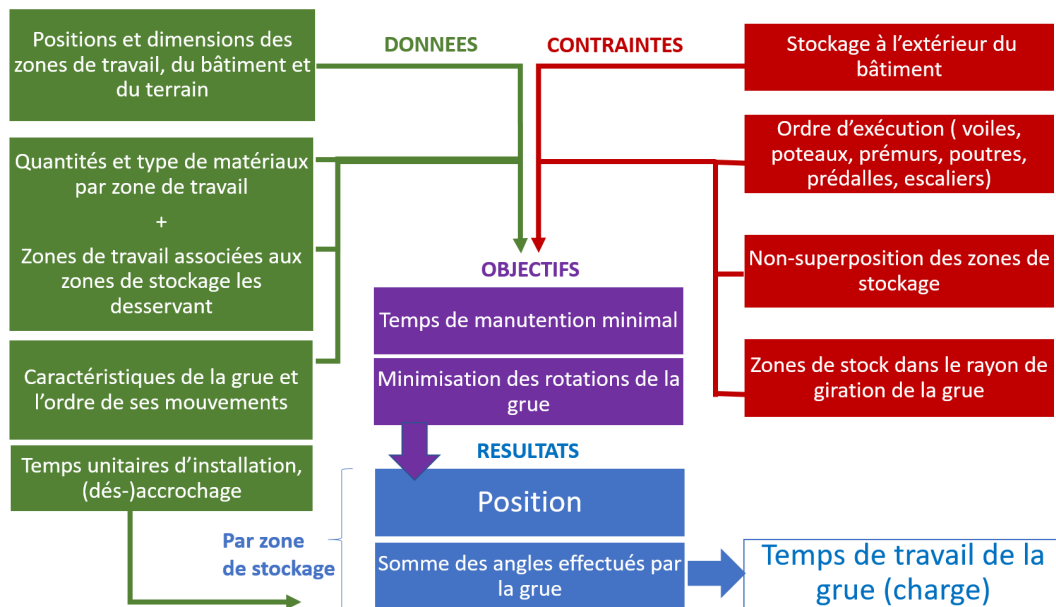


FIGURE 66 – L'algorithme tel que modélisé

6.6 Résultats

L'algorithme a été conçu à l'aide du logiciel Matlab dont les codes sont disponibles en annexes D.5. Quatre cas différents ont été simulés :

1. Le cas représenté sur les plans (cas réel)
2. Un cas optimal en ne tenant pas compte des bâtiments avoisinants
3. Une version optimale considérant les réalités physiques avoisinantes
4. Un cas défavorable

Le but était donc de calculer la somme totale des angles effectués par la grue par zone de stockage. Cette somme pouvait être divisée par la vitesse radiale de la grue pour approximer un temps de déplacement. Finalement, cette durée est ajoutée aux autres temps de déplacements requis ainsi qu'à la durée d'installation, d'accrochage et dés-accrochage.

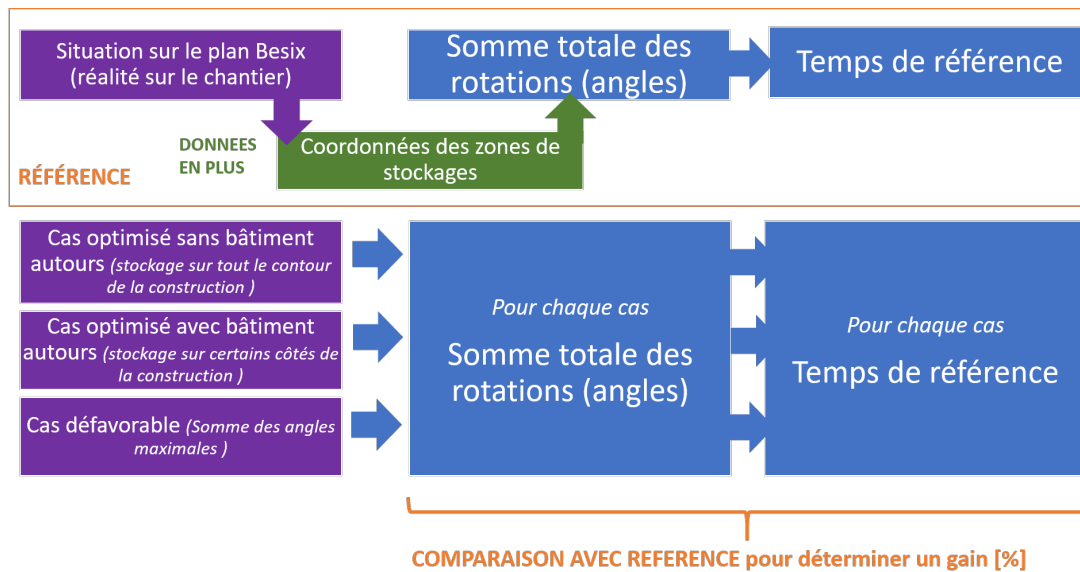


FIGURE 67 – Les différents cas à simuler

A. Situation réelle Le résultat de la situation réelle est repris sur la figure 68. Chaque zone de stockage³¹ (en rouge) reprise sur le plan d'installation fourni par Besix a été introduite dans l'algorithme par les coordonnées de son centre. Cela représente donc des données supplémentaires au problème. L'objectif est de calculer la valeur des différents angles θ pour utiliser ces données comme références dans un but de comparaison avec les autres cas étudiés ci-après. La grue est représentée par un point bleu définissant l'origine du plan. Ensuite, les domaines admissibles, donc l'endroit où les zones de stockages peuvent être localisées, se trouvent dans la surface blanche entre les échelles de couleurs les plus foncées. En effet, ces dernières ne sont uniquement qu'une représentation des contraintes dans le logiciel et c'est seulement à leurs lignes extérieures la plus foncée qu'il faut s'intéresser. En fin de compte, les points rouges sont les zones de stocks connectées par des lignes discontinues à leurs zones de demande respectives (points verts). Le bâtiment réel à construire est en orange transparent au centre de l'image.

31. la surface des carrés représentés sur les différentes figures est indicative vu que celle-ci n'a pas été calculée

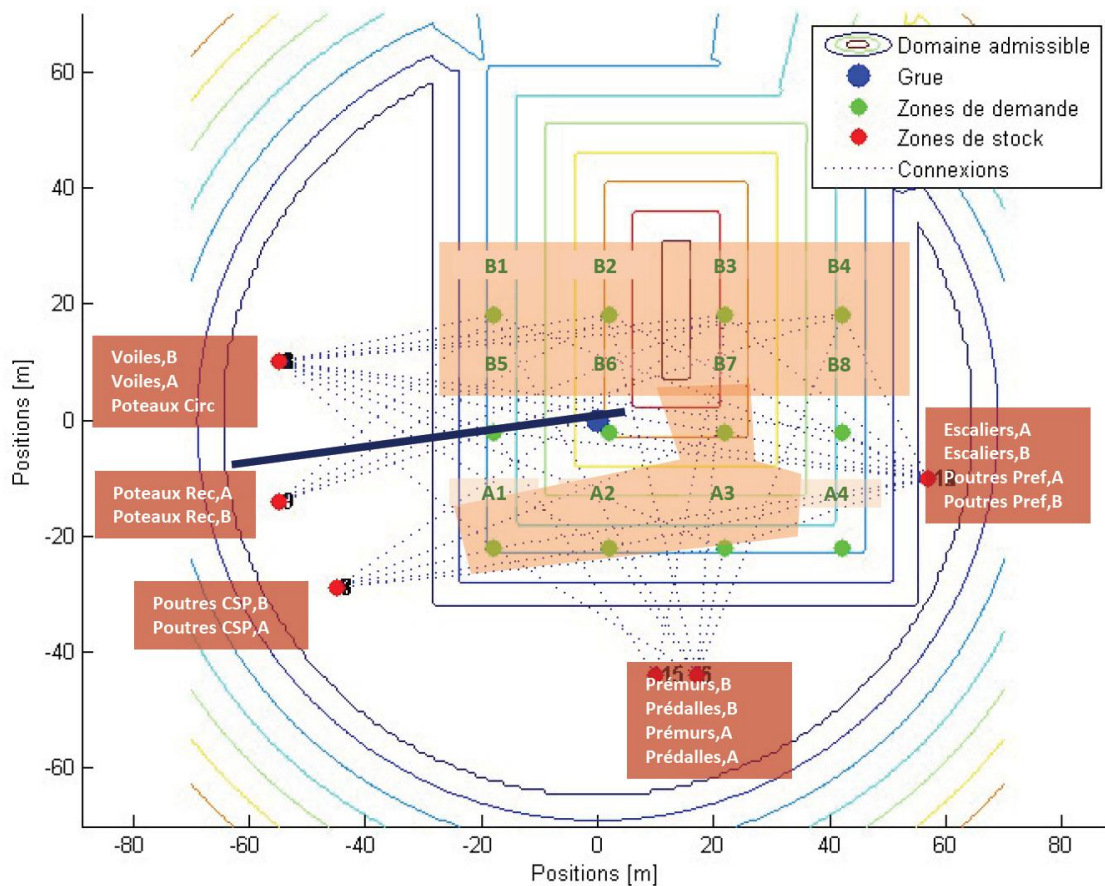


FIGURE 68 – Illustration des résultats pour la situation sur les plans fournis par Besix

Les résultats de cette analyse ont été repris dans le tableau 8. Il reprend la somme des rotations de la grue en degrés, le temps nécessaire à ces rotations et le temps de mouvement de grue. Ce dernier représente un temps moyen fourni par les feuilles de calcul (saturation de la grue) de Besix comme étant la somme des déplacements horizontaux du chariot de la grue et du levage ainsi que de la descente du matériel. Cela représente en moyenne 20 secondes par élément. Ainsi, le temps de mouvement de la grue représente le temps de rotation additionné au temps moyen décrit précédemment. Finalement, la dernière colonne est le résultat du temps de mouvement de la grue additionnée avec les temps d'installation d'accrochage et de décrochage par élément (valeurs typiques fournies dans les feuilles de calculs de Besix). En plus des totaux, ces résultats sont calculés en valeurs moyennes par éléments. En effet, pour cette séance d'exécution, il y a 276 mouvements à réaliser par la grue repris dans le tableau 7.

TABLE 8 – Résultats obtenus pour le cas des plans de Besix, qui servira de référence pour la comparaison

	Sommes des angles	Temps total de rotation	Temps total de mouvements de grue	Temps total
Total	29225°	101 min	192 min	2562 min
En moyenne par mouvement (276 au total)	106°	22 s	41 s	9 min

Les résultats montre un temps de rotation de 101 minutes pour un temps total de 2562 min. Cela

représente seulement 4% de la durée totale. Cela équivaut à 5,3 jours de travail sur les 36 planifiés pour cette séquence. Évidemment, toutes les activités n'ont pas été modélisées dans le programme comme le bétonnage.

La portion prise par la rotation par rapport aux mouvement de grue est de 53 %, ce qui est non négligeable. Enfin, il peut être compris qu'il faut approximativement le même temps en moyenne par élément pour réaliser la rotation (22 secondes) que pour effectuer les autres actions de la grue (19 secondes).

B. Cas optimisé sans contrainte environnante Une première optimisation (cfr. figure 69) a été réalisée sans les contraintes des autres bâtiments avoisinants le bâtiment A et B1. Cela s'écarte de la réalité, l'objectif secondaire est aussi de démontrer que le stockage intérieur doit être considéré et planifié, ce qui n'est pas réalisé en pratique. Pourtant, il a été vu précédemment que sur des chantiers comme City Dox cela peut représenter d'énormes surfaces. Les objectifs sont de déterminer les positions des zones de stockages (en rouge), le temps et les mouvements de rotation requis pour effectuer alors toutes les opérations identiques au cas A et pourvoir comparer avec le cas implémenté par Besix (cas A).

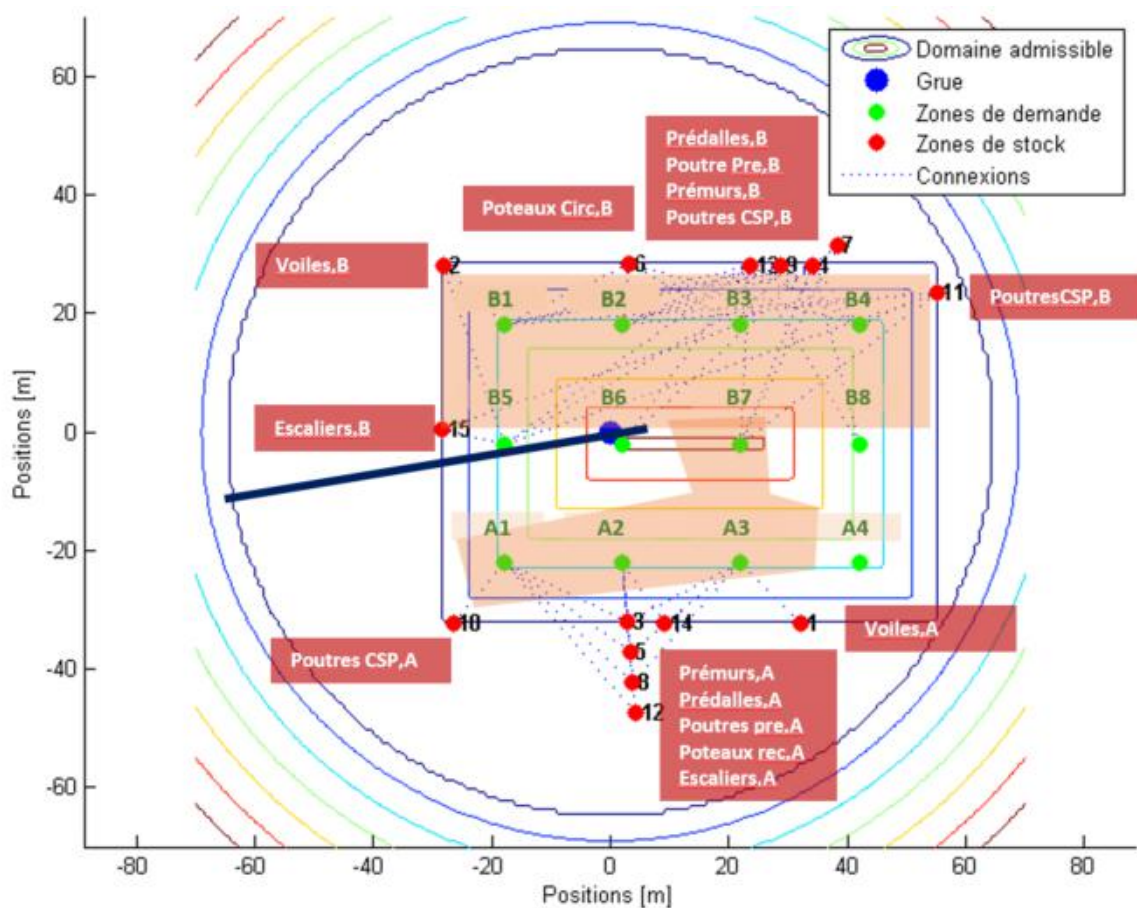


FIGURE 69 – Illustration des résultats pour le cas optimisé sans contrainte

Les résultats de cette analyse ont été repris dans le tableau 9 identique au cas précédent. Les mêmes hypothèses sont reprises pour les différents cas analysés et leurs résultats. Finalement, la dernière ligne du tableau représente la comparaison en % de ce cas par rapport au cas de référence (i.e cas A : la situation réelle).

TABLE 9 – Résultats obtenus pour le cas optimisé avec stockage autorisé tout autour du bâtiment

	Sommes des angles	Temps total de rotation	Temps total de mouvements de grue	Temps total
Total	9686°	34 min	124 min	2494 min
En moyenne par mouvement (276 au total)	35°	7 s	27 s	9 min
Comparaison par rapport au cas A	-66%	-66%	-35%	-3%

Les résultats montrent effectivement une réduction drastique des rotations de la grue. Certes, l'algorithme donne uniquement un minimum local et donc il pourrait avoir une meilleure solution mais la complexité de calcul serait dès lors plus importante. Toutefois, il peut déjà être conclu que malgré un gain pour les rotations de 66% par rapport au cas de référence, quand le temps total est pris en compte, il s'élève uniquement à 3%, ce qui est faible. Par contre, les valeurs annoncées par des études comme celle de Ning (27% [19]), sont bien comparables au pourcentage obtenu (35%) pour ce qui est du temps des mouvements de la grue. Ces résultats seront mis en perspective et discutés dans la section suivante.

C. Cas optimisé avec contraintes environnantes Une seconde optimisation (cfr. figure 70) a été réalisée avec les contraintes des autres bâtiments avoisinants le bâtiment A et B1. C'est la situation qui se rapproche, ainsi, le plus de la réalité. Les gains observés dans le cas B devraient donc être réduits dû à cette contrainte qui éloigne certaines zones de stockage. En effet, comme il peut être observé sur la figure 70, les zones de stockage se trouvant en haut de l'image comme les prédalles pour le bâtiment B, se localisaient dans le cas B précédent le long du côté supérieur du bâtiment (cfr. figure 69).

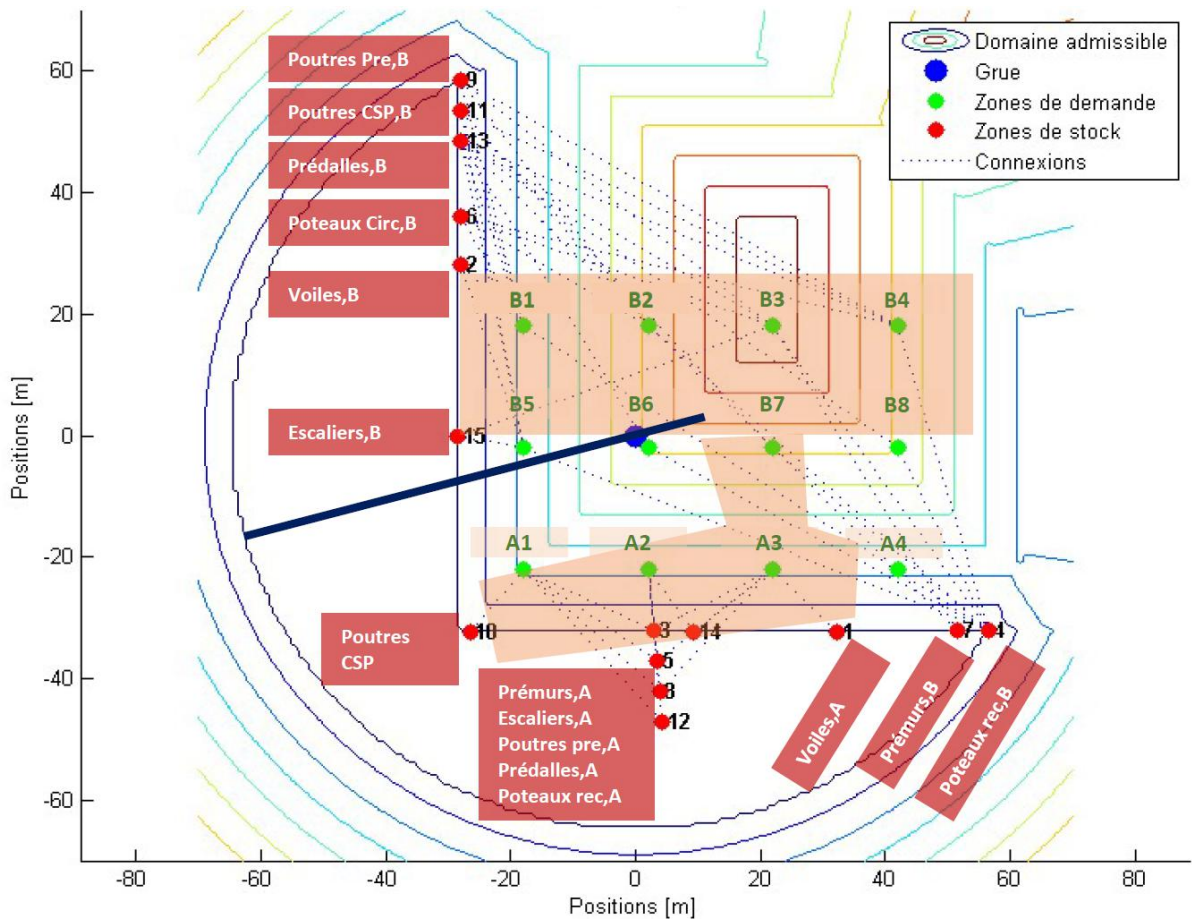


FIGURE 70 – Illustration des résultats pour le cas optimisé avec contraintes

Les résultats de cette analyse ont été repris dans le tableau 10 identique aux cas précédents.

TABLEAU 10 – Résultats obtenus pour le cas optimisé avec stockage à l'extérieur du bâtiment uniquement

	Sommes des angles	Temps total de rotation	Temps total de mouvements de grue	Temps total
Total	13821°	48 min	138 min	2508 min
En moyenne par mouvement (276 au total)	50°	11 s	30 s	9 min
Comparaison par rapport au cas A	-53%	-53%	-28%	-2%

Ce cas démontre une nouvelle fois la part réduite de la rotation de la grue dans la durée totale de manutention. En effet, le gain par rapport au cas réel est de 2% (1% moins bon que le cas B). Toutefois, il peut être observé qu'un avantage de 53% sur la rotation de la grue peut être observé même en ne stockant pas tout autour du bâtiment. En effet, la différence entre le cas B et le cas présent concernant la rotation est alors de 14% et pour les mouvements totaux de 7%.

D. Cas défavorable Un cas très défavorable a été analysé à titre de comparaison, repris sur la figure 71. A la place de minimiser la somme des angles de rotation, elle a été maximisée. Il illustre l'importance ou non de planifier correctement la disposition du site. Ainsi, après analyse des déplacements et donc des temps correspondants, une conclusion pourra être tirée sur l'utilité d'une telle optimisation et de sa mise en œuvre. Mais aussi, sur l'importance à accorder au plan d'installation.

La figure 71 expose les résultats obtenus pour les positions des zones de stockages (en rouge) qui sont éloignées au maximum de la grue. Ces résultats doivent être évidemment discutés en considérant les capacités de la grue à une distance telle qui peuvent être obtenus par la fiche technique de cette dernière.

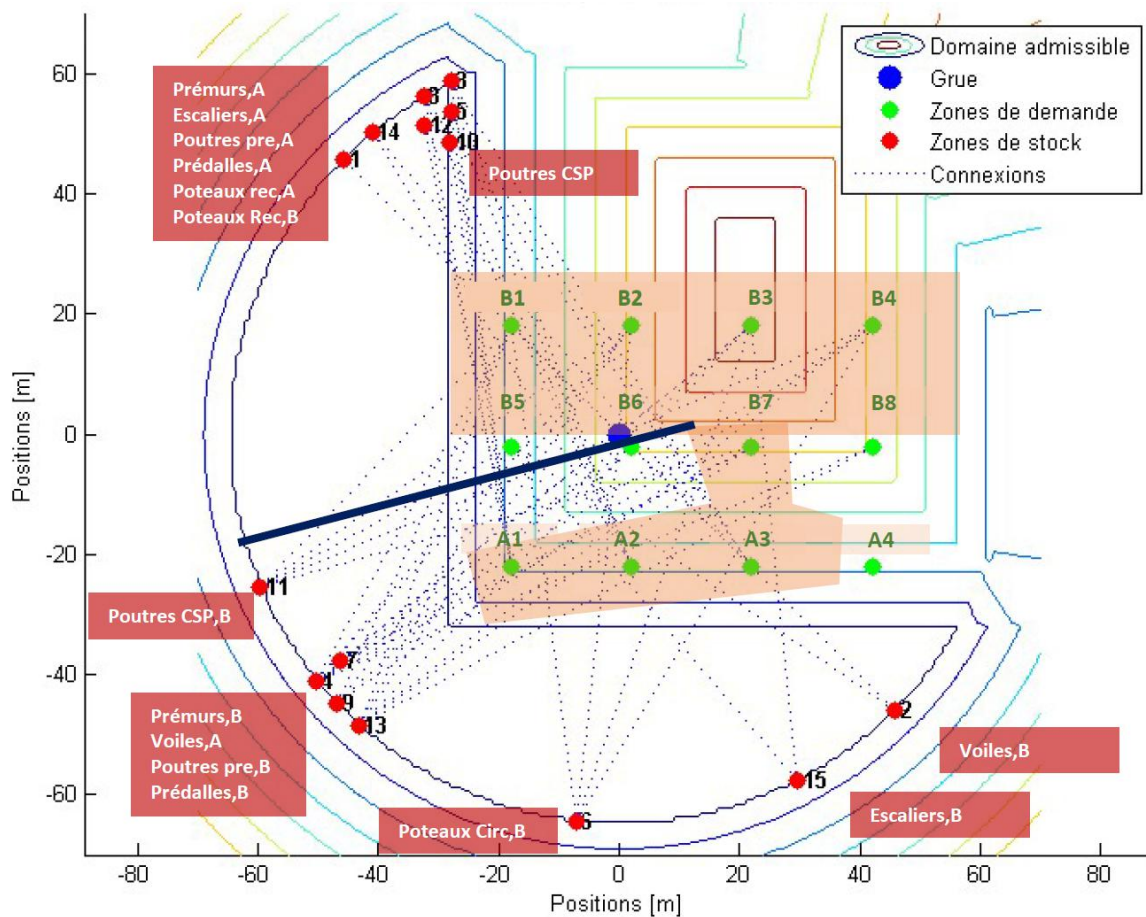


FIGURE 71 – Illustration des résultats pour le cas défavorable

A nouveau, une comparaison a été effectuée par rapport au cas réel et les différents valeurs obtenues sont reprises dans le tableau. 11

TABLE 11 – Résultats obtenus pour le cas défavorable avec maximisation des angles de rotation

	Sommes des angles	Temps total de rotation	Temps total de mouvements de grue	Temps total
Total	40135°	139 min	229 min	2600 min
En moyenne par mouvement (276 au total)	145°	30 s	50 s	9 min 30s
Comparaison par rapport au cas A	+37%	+37%	+20%	+1.5%

Ce dernier cas confirme à nouveau ce qui a été déjà observé : la différence totale avec le cas réel reste faible (perte de 1,5%). En outre, entre le cas défavorable et le cas B qui représente la meilleure optimisation, il n’y a qu’un gain approximatif de 4% (i.e. 106 min) pour l’optimisation. En moyenne, une opération du cas B dure 9 minutes. Donc, 11 opérations en plus pourraient être réalisées sur les 36 jours que dure la séquence.

La section 6.6.1 suivante met en perspective les différents résultats dans le but de pouvoir tirer des conclusions de l’étude effectuée sur le stockage du projet de la clinique de Melun. Enfin, les différents cas sont ensuite discutés par rapport aux résultats obtenus, à la réalité des chantiers et par les hypothèses expliquées précédemment.

6.6.1 Analyse des résultats

Les résultats obtenus sont synthétisés à l’aide des tableaux suivants. La figure 72 représente la visualisation des résultats obtenus précédemment. Ainsi, comme constaté antérieurement, une importante différence existe entre le cas 1 suggéré par Besix et les autres cas simulés pour les temps de rotation. Cependant, en comparant les temps totaux qui prennent en compte en plus des mouvements de grue, le temps de dépose/installation, pour attacher et détacher les élingues³², il peut être observé que la différence est minime (ce point sera débattu dans la section discussions). Il pourrait donc être conclu que cette optimisation de la répartition des zones de stockage n’est pas nécessaire. Cependant, lorsqu’une analyse plus approfondie est réalisée en s’intéressant indépendamment à chaque type de matériaux devant être transporté, des autres conclusions peuvent être tirées.

32. Ensemble de câbles permettant d’accrocher l’éléments à la grue

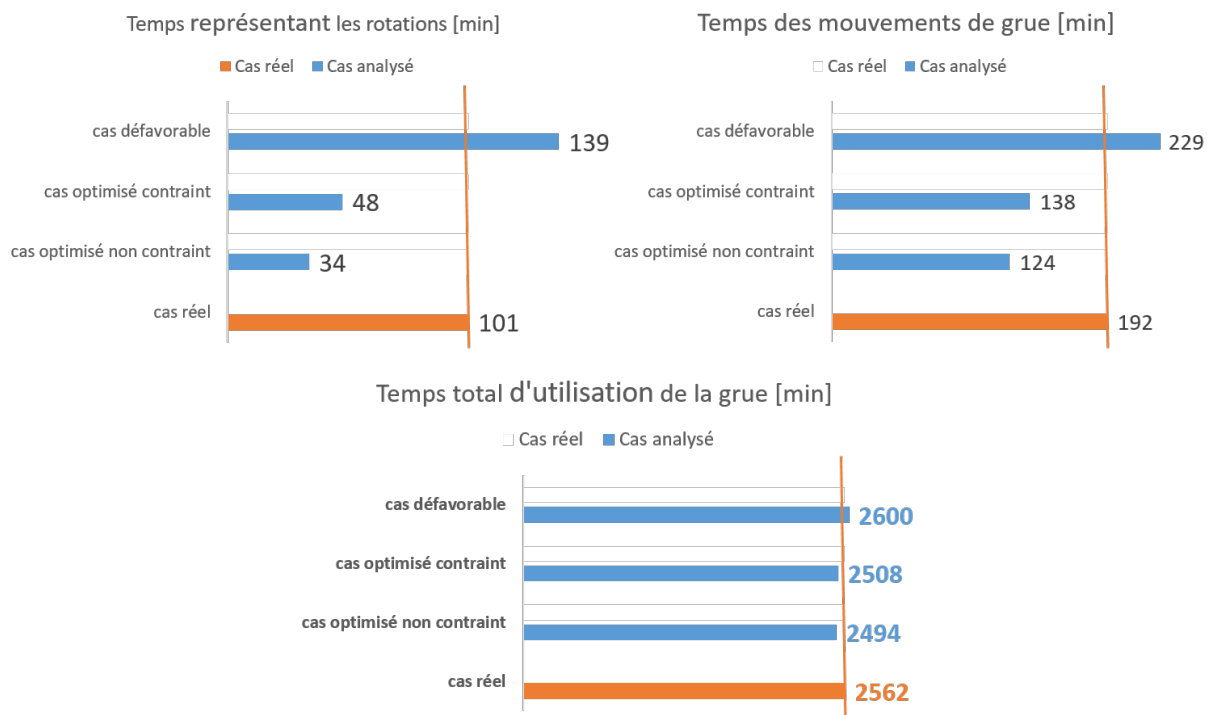


FIGURE 72 – Comparaison relative entre les différents cas simulés avec la solution proposée par Besix (cas réel)

En effet, l'examen des figures 73,74, ainsi que des temps unitaires d'installation³³ par élément, c'est surtout les opérations de ferrailage ($0,15 \text{ min}/m^2$) et de coffrage ($0,09 \text{ min}/m^2$) où l'optimisation s'avèrent le plus utile, car le temps de déplacement est prépondérant. Comme l'opération sur le placement des coffrages des voiles pour le bâtiment A, où un gain de pres de 14% peut être théoriquement observé (cfr figure74).Cela s'explique par le fait que le grutier vient seulement déposer le matériel et ne le maintient pas en suspension comme avec des prémurs.

33. un exemple est fourni en annexe, il provient de la documentation que Besix nous a fournie

RÉPARTITION DU TEMPS D'UTILISATION DE LA GRUE PAR ELEMENT

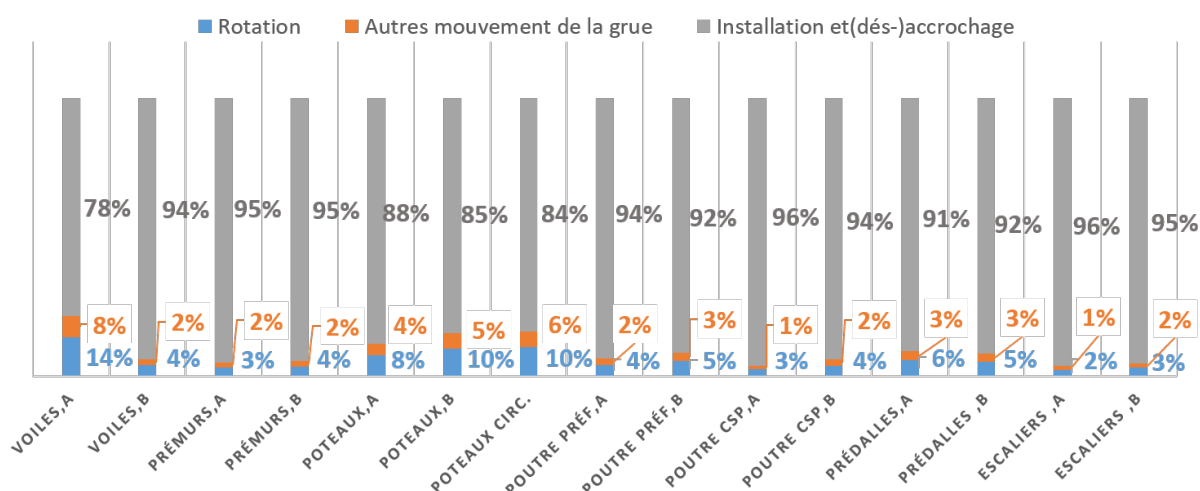


FIGURE 73 – Répartition du temps d'utilisation de la grue, il comprend le temps d'installation, d'accrochage et décrochage (en gris), le temps de rotation (en bleu) et le temps concernant les autres mouvements (levage, descente et déplacements du chariot)

La figure 73 indique la faible part que représente les mouvements de la grue dans sa mobilisation complète. En effet, il y a toujours en moyenne 4 minutes à ajouter aux mouvements de la grue pour attacher et détacher les fixations des câbles au matériel. A ce temps, il faut encore majorer le temps d'installation ou de pose qui varie de deux à une dizaine de minutes. Finalement, même si la rotation représente une part majoritaire de la durée où la grue est en mouvement (c'est du principalement à la vitesse de rotation de la grue qui est plus faible que la vitesse de levage), cela reste faible par rapport au temps de mobilisation total.

La figure 74 montre en orange, les gains obtenus grâce à l'optimisation avec les contraintes des bâtiments environnants par rapport au cas réel. En bleu, les gains obtenus pour la même analogie mais en comparant les temps totaux. Il peut être observé que les gains pour les rotations varient fortement tandis que la courbe bleue reste assez constante. C'est évidemment dû au fait, à nouveau, que la rotation ne représente qu'une faible partie du temps de la mobilisation complète. Finalement, ce dernier graphique montre une perte de plus de 80% pour le placement des escaliers du bâtiment A et donc que la zone de stockage est moins bien placée. C'est contraire à ce que l'algorithme devrait effectuer. En réalité, c'est dû à la contrainte de non-superposition qui assure que les zones de stockage soient au moins distantes de 5 mètres. Le programme a dès lors déplacé la zone concernant les escaliers pour éviter de violer cette contrainte. L'expérience d'un planner est donc requise pour analyser les propositions du programme.

COMPARAISON DE DURÉE ENTRE CAS RÉEL ET CAS OPTIMISÉ CONTRAINT POUR LES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX

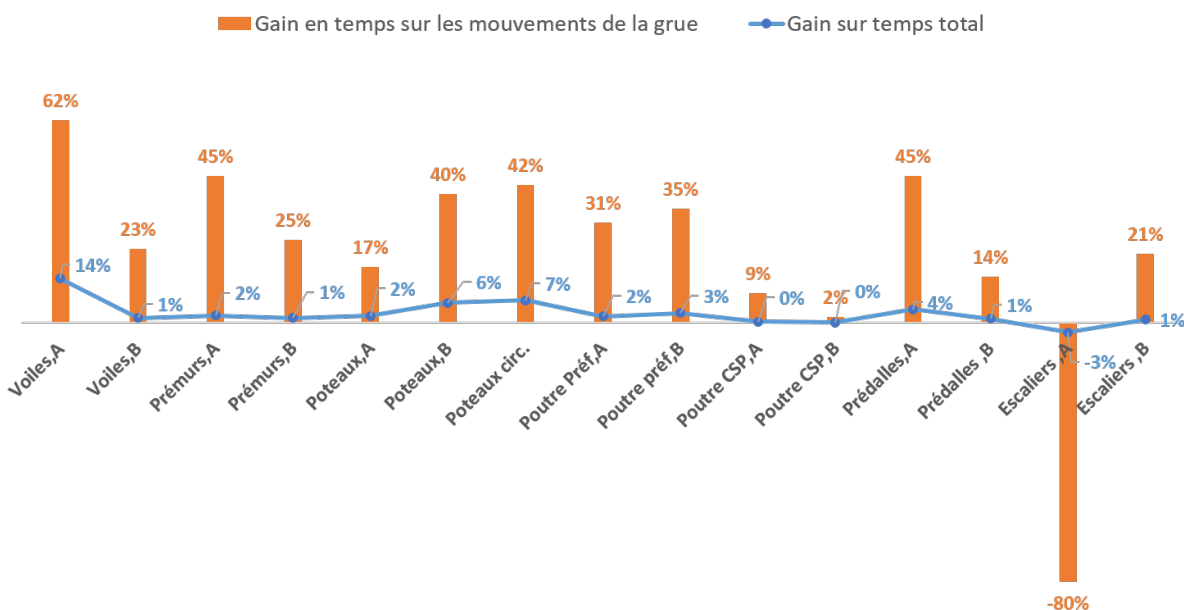


FIGURE 74 – Comparaison des gains en temps entre le cas réel et optimisé contraints, sur le temps de rotation et sur le temps total de la manutention de la grue

Conclusion A partir de l'analyse précédente, les éléments suivants peuvent être conclus :

1. Placer de façon optimale les coffrages et les ferrillages ainsi que les éléments comme les poutres préfabriquées.
2. Pour les autres éléments, même s'ils sont relativement mal placés, si leur position est clairement identifiée (ce qui est rarement le cas en analysant les chantiers visités), le gain sera tout de même marginal.
3. Les études précédentes mettent en évidence des gains de près de 30%. Cependant, ils ne considèrent généralement pas le temps d'installation qui est prépondérant dans la durée de mobilisation de la grue : le gain final obtenu n'est que de 2%.
4. La main d'œuvre doit être absolument bien formée pour ne pas rallonger ces temps d'installation.
5. Plus le chantier à une durée d'exécution importante, plus il faudra s'intéresser aux zones de stockage et aux mouvements de la grue.

6.6.2 Discussions

Ces résultats doivent être discutés par rapport aux hypothèses effectuées, aux contraintes physiques du terrain et à l'expérience des professionnels. En comparant avec les études précédentes, une des principales différences est que la position que la grue est fixe dans ce mémoire alors que les autres chercheurs tentent aussi de l'optimiser. Ce choix a été pris dans un but de rendre le programme aussi simple que possible (cfr section développement logiciel), mais surtout applicable durant l'exécution où la position de la grue est fixe.

Simplifications géométriques L'algorithme a nécessité des simplifications géométriques qui rendent le problème modélisable rapidement mais l'éloigne de la réalité. Effectivement, toutes les zones de stockage ne sont pas des rectangles et si elles le sont, ne le restent pas avec l'avancement du chantier et l'entropie qui en résulte. Cependant, la différence relative d'un objet se trouvant à quelques mètres de la zone prévue impacte peu le déplacement de la grue et donc *a fortiori* le temps nécessaire.

Dimensions verticales Il a été admis que la dimension verticale du déplacement n'était pas prise en compte. En effet, la vitesse verticale du chariot de la grue est de 100 m/min alors que la vitesse radiale est de 0.8 rot/min. Ainsi, dans l'analyse des mouvements de la grue, la rotation représente 66% du temps utilisé (cfr. Figure 75).

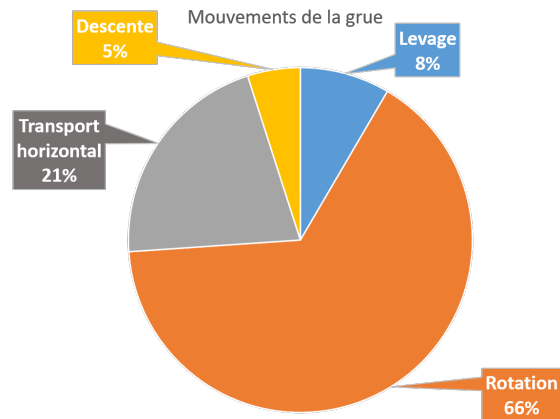


FIGURE 75 – Répartition des mouvements de grue

Dimensions des zones de stockage Les dimensions de chaque zone de stockage ne sont pas spécifiées. En effet, vu qu'elles varient avec le temps, le problème devient dynamique et bien plus difficile à modéliser. De plus, vu l'absence de données précises concernant les métrés opérationnels et l'impossibilité de disposer des plannings détaillés au quotidien en phase de préparation, l'exercice ne peut pas donner des résultats applicables. Il faut donc absolument que le secteur de la construction génère beaucoup plus de données, qu'elles soient stockées et gérées de manière professionnelle dans le but de réaliser des analyses de Big Data. En outre, l'implémentation du stockage vertical étudié dans la section suivante permettrait un gain de place important. En outre, ce problème d'optimisation ne concerne qu'une seule grue et donc ne gère pas les interférences entre de multiples grues.

Main d'oeuvre Finalement, l'importance d'une main d'oeuvre de qualité est primordiale. En effet, les temps de mouvements de grue sont en réalité une part infime de la charge de la grue (entre 5 et 20% pour le cas analysé). Par exemple, le temps d'installation d'un prémur est estimé à 10 minutes pour moins d'une minute de déplacement. La question de l'utilité de ce genre d'optimisation peut dès lors se poser. Cependant, l'optique Lean représente le fait d'éliminer tout gaspillage et c'est la conjonction de toutes ces améliorations qui va augmenter la productivité de manière importante.

Avantages supplémentaires Au terme, après les visites effectuées, il est clair que certains avantages ne peuvent être mesurés comme l'amélioration de l'organisation du chantier qui résulterait en une perte de temps plus faible pour trouver des matériaux, un meilleur maintien de l'ordre et donc une sécurité plus accrue ou encore un gain en consommation énergétique de la grue. La situation actuelle ne permet pas l'*autonomisation* des équipes. En effet, rien n'est suffisamment organisé que pour rendre le flux continu et logique : pas de plan de stock avec la localisation des éléments, pas de gestion des quantités suivant

la place disponible ou encore non prise en compte des espaces intérieurs comme avec le jardin suspendu de City Doox. Avec la réflexion qu'apporte ce mémoire et l'organisation structurée qu'aurait le chantier, il peut être imaginé que le grutier dispose du plan des zones de stock et agit en autonomie tout comme les ouvriers qui ne devraient pas faire des déplacements inutiles dus à des erreurs de localisation. Bien sûr, il faut mettre les éléments en contexte et comme l'a souligné le directeur de projet de The One, cela peut paraître évident pour des ingénieurs mais pas forcément pour des ouvriers. Il faut donc organiser le chantier théoriquement avec ce genre d'optimisation mais il faut ensuite la supporter dans sa mise en œuvre avec du management visuel pour rendre des zones de stockage simples et durables.

6.7 Développement logiciel

Dans un souci de rendre le programme réutilisable et facile d'utilisation par une personne non familière de la programmation Matlab, une interface graphique a été implémentée (cfr. figure 76). L'utilisateur doit juste avoir à disposition le nombre de zones de stockage qu'il désire, le nombre de zones de demande ainsi que les coordonnées de leurs centres et les coordonnées du bâtiment qui devra être construit ainsi que du terrain. Finalement, il devra aussi établir les correspondances entre les quantités nécessaires par zone de demande et les zones de stockage associées. Comme il sera argumenté plus en détail par après, l'avantage du modèle BIM est de pouvoir générer ces données automatiquement et de manière plus précise, ce qui pourrait rendre ce programme réellement applicable dans des projets concrets.

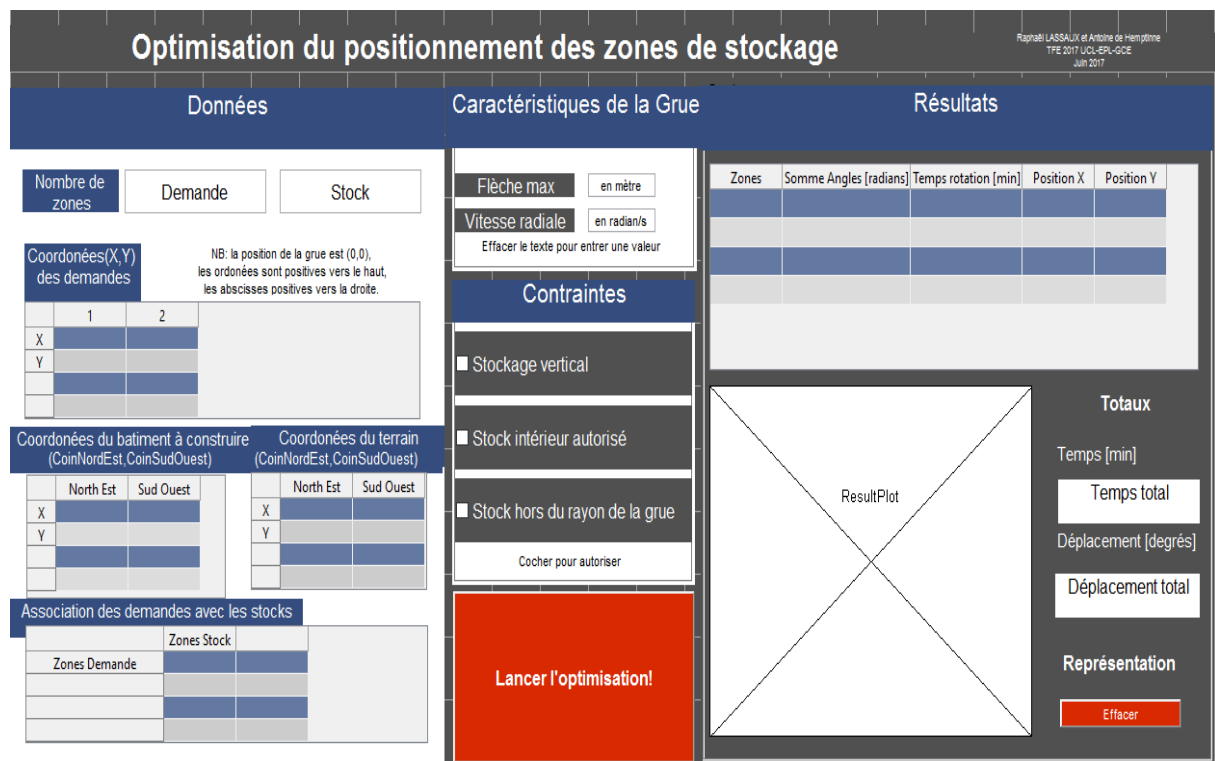


FIGURE 76 – Interface graphique à l'aide du logiciel Matlab

6.7.1 Mode d'emploi

Un mode d'emploi simplifié est décrit dans cette sous-section. Bien sûr, l'interface graphique est un prototype qu'il faudrait affiner.

cdot **Données** Comme expliqué ci-dessus, l'utilisateur devra d'abord rassembler quelques informations avant de pouvoir utiliser le programme. Il commencera par introduire le nombre de zones de stockage et de demande. Ensuite, il entrera les coordonnées de ces zones de demande. De plus, il injectera les coordonnées géométriques du bâtiment et du terrain. Le travail le plus important réside dans le dernier tableau à remplir, où il associera chaque zone de stockage à une ou des zones de demandes ainsi que le nombre de déplacements qui seront nécessaires (par ex. 3 prémurs = entrer le chiffre 3). Il devra entrer les zones de stockage horizontalement en suivant la séquence d'exécution. Par exemple, si les colonnes sont placées avant les poutres, les associations pour les colonnes se trouveront alors en première ligne et en deuxième ligne, les poutres.

· **Caractéristiques de la grue et contraintes** L'utilisateur doit maintenant introduire les caractéristiques de la grue comme sa flèche maximale et sa vitesse radiale en radian par seconde. Il devra aussi choisir les contraintes pour lesquelles il désire optimiser le problème : la première concerne la non-superposition des zones de stockage. Ainsi, la possibilité d'un stockage vertical peut être autorisée. La deuxième concerne la possibilité d'un stockage intérieur. Finalement, la seconde donne une possibilité à l'utilisateur s'il le désire de simuler des zones de stockage en dehors du rayon de la grue. Une version plus poussée de l'algorithme devrait être réalisée et prendre en compte les capacités de la grue pour un rayon donné (cette caractéristique n'a pas été implémentée pour le moment).

Résultats Après avoir lancer l'optimisation, l'utilisateur aura accès aux déplacements angulaires, aux temps de rotation de la grue par zone (avec les coordonnées) et aux totaux. En fin de compte, une image de la simulation avec la disposition du chantier sera affichée. Elle représentera la proposition que le planneur ou le gestionnaire devra analyser et interpréter pour la mettre en pratique

La valeur ajoutée de ce projet est la possibilité d'ajouter ou non des contraintes, de rendre l'utilisation simple et paramétrable sans aucun pré-requis en programmation ou en algorithme. Enfin, la programme affiche aussi des temps de réalisation, le tout rassemblé dans une fenêtre.

6.7.2 Implémentation et limites

Les limites de cet algorithme représentent ses implémentations possibles. En effet, une seule grue est modélisée et donc l'interaction avec les autres grues n'est pas considérée. De plus, le bâtiment ne peut être défini que par un rectangle et uniquement les positions des zones de stockage sont suggérées. Ainsi, une implémentation serait dans un premier temps de faciliter le travail d'un planneur en désignant les zones préférentielles où il faudrait stocker. Ensuite, ce dernier devrait réaliser son travail habituel en réalisant le plan d'installation total avec ces suggestions. En outre, tous les types de matériaux n'ont pas été modélisés, mais peuvent l'être si le métré opérationnel détaillé est disponible. De plus, le programme ne gère pas encore correctement l'ordre de la séquence d'exécution.

En résumé, pour rendre ce programme implémentable pour un projet réel, il faut qu'il y ait suffisamment de données disponibles lors de la réalisation du plan d'installation.

6.8 Travail futur

Le travail effectué ne représente qu'une part infime de tous les efforts qui doivent être accomplis pour que la gestion des stocks soit optimale sur chantier. Ce travail permet de conscientiser sur leur importance

dans le succès d'un site de construction. Il s'inscrit donc dans une démarche globale. En effet, les éléments devraient être incorporés à l'algorithme pour lui permettre une pleine efficacité. De plus, ce programme est assez sommaire et de nombreuses caractéristiques des chantiers n'ont pas été prises en compte, comme les conditions de sol, le facteur temps, les erreurs humaines, la sécurité, etc.

Quelques intégrations et travaux futurs possibles sont suggérés dans les sous-sections suivantes. L'intégration du stockage vertical sera, notamment, évoquée.

6.8.1 Intégration de la dynamique

Comme il a été évoqué précédemment, généralement, un seul plan d'installation des stocks est prévu et n'est pas évolutif selon l'avancement du chantier. Pourtant, les types et le nombre de matériaux varient fortement suivant les phases du projet. Ainsi, la création en phase de préparation de plusieurs plans permettrait d'organiser au mieux le chantier. Pour que cela soit réalisé, il sera primordial d'avoir des métrés opérationnels quotidiens en phase de préparation, alors que la pratique courante fournit seulement des documents avec des données générales. C'est donc par la précision des données et leur disponibilité qu'il sera possible d'intégrer correctement la dimension "temps" et le stockage dynamique. Il faudrait introduire, notamment, les délais de livraison. Ainsi, le projet du Luxembourg Institut of Technology avec SUCCESS ou encore le projet URBANWISE du CSTC, permettront de mieux prévoir ces délais et de les rendre plus fiables. C'est un constat qu'il a souvent été remarqué sur les chantiers visités, les livraisons et les sous-traitants ne sont pas assez fiables pour prévoir de manière objective la séquence d'exécution quotidienne. En outre, l'implémentation des changements peut se faire aisément dans l'algorithme une fois les zones de demande connues et les quantités à transporter définies. Finalement, la tâche peut être automatisée grâce à l'avènement du BIM.

6.8.2 Intégration dans le BIM

Des modèles BIM de niveau élevé permettront d'ajouter cet algorithme comme un plug-in au modèle dans le but de produire des plans d'installation presque automatiquement. En effet, un modèle associé à un planning détaillé permettra de disposer des bases de données efficaces et d'utiliser ses valeurs dans l'algorithme. Tout comme il existe des modèles 4D BIM pour la visualisation de l'évolution de la construction, il sera aussi possible de modéliser l'évolution du stockage, ses emplacements, les flux entrants et sortants de camions et de marchandises et ainsi observer et résoudre d'éventuels conflits. Enfin, avec la dimension 5D et donc l'insertion des coûts, il sera possible d'évaluer plus précisément le budget.

6.8.3 Intégration du stockage vertical

La partie précédente de ce mémoire s'intéresse au deuxième axe d'amélioration après le positionnement des zones, la réduction de leur surface. S'il est avéré que le stockage 3D tel que mis en place dans l'industrie est faisable économiquement, d'un point de vue organisationnel et sécuritaire, il pourra être associé à l'algorithme. En effet, dans le cas étudié, il y a une contrainte de non superposition. Dès lors, enlever cette contrainte viendrait à autoriser le stockage vertical. De plus, comme énoncé dans les conclusions de cette recherche, le ferrailage fait parti des matériaux auxquelles il faut prioritairement s'intéresser et est donc un bon premier point d'étude pour l'association entre les deux parties de ce mémoire. En effet, le temps nécessaire pour déposer, attacher et dés-attacher des barres d'armatures est d'environ 4 minutes. Le déplacement de lot d'armatures est quant à lui d'environ 1 minute. Ainsi, il peut être compris que 25% de la durée totale est due aux mouvements de la grue, ce qui correspond à la partie optimisable.

Les conclusions sur le stockage vertical émettent un gain de 11% sur les poutres et les colonnes et de 14% sur le ferrailage des voiles. Finalement, associer ce type stockage avec une optimisation de leur

distribution, où un gain de 7 à 15% est observé théoriquement pour ce genre d'activité pourrait améliorer significativement les processus de fabrication sur chantier comme représenté sur la figure 77.

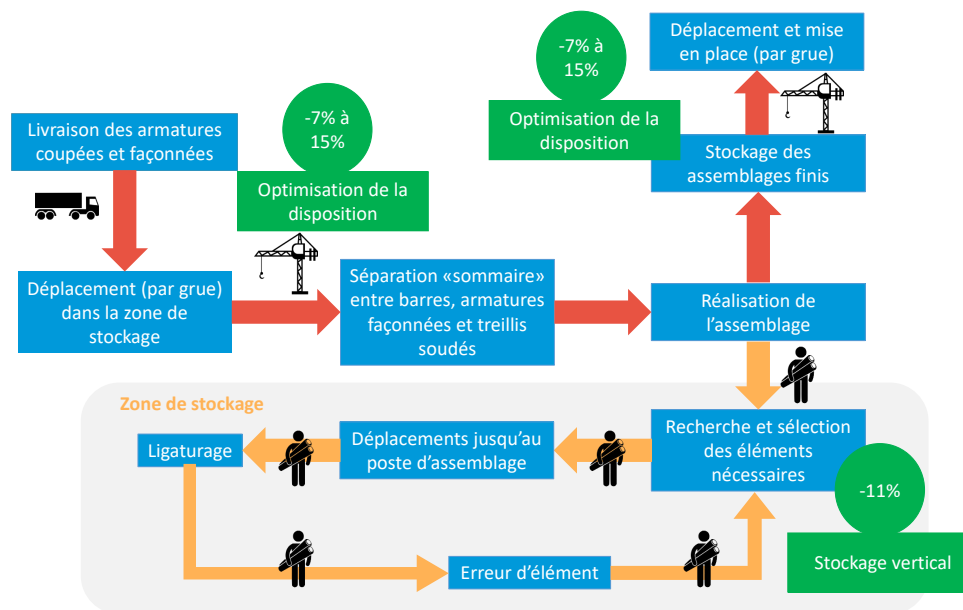


FIGURE 77 – Cartographie des chaînes de valeur du stock d'armatures amélioré par le stockage vertical et l'optimisation de leurs répartitions

6.9 Conclusion

Le *Lean Thinking* est la recherche de la perfection. De ce fait, tout gaspillage, aussi minime qu'il soit, doit être éliminé. Certes, les résultats chiffrés de l'optimisation de la disposition des zones de stockage sont à la hauteur des marges bénéficiaires des chantiers, faibles, de l'ordre de 2 ou 3%. Toutefois, de nombreux avantages non chiffrables sont possibles :

1. Une meilleure organisation du chantier avec des positions de type de zones de stockage clairement identifiées.
2. Une mise en autonomie des équipes plus simple par la disposition fixée des zones de stockage.
3. Un inventaire plus aisé car les éléments seront regroupés.
4. D'autres avantages organisationnels et sécuritaires.

Finalement, sur des chantiers de longue durée, le gain devient assez important. Il est donc essentiel de s'intéresser à la disposition par type d'élément des zones de stockage. De plus, les temps d'installation par les ouvriers sont les points critiques du respect du planning. Il faut donc s'assurer qu'ils sont formés correctement, comme le suggère la philosophie Lean.

La critique qui peut être émise est le fait que ce plan d'installation soit respecté tout au long du chantier par les ouvriers. En effet, sans une mise en place adéquate, il a de fortes chances qu'après quelques jours, le désordre règne à nouveau sur le site. Il est donc nécessaire de supporter cette optimisation par un management visuel avec des pictogrammes simples, des délimitations et des explications aux ouvriers. Cette optimisation n'a pas pour but de remplacer un planificateur mais de l'aider dans sa prise de décision pour l'organisation du chantier, de sensibiliser les gestionnaires sur l'importance de la disposition des zones de stockage et la nécessité de collecter bien plus de données et des retours d'expérience sur les différents chantiers.

7 Conclusion

Le développement du Lean Construction passe ces dernières années à la vitesse supérieure. En effet, de plus en plus d'entreprises générales décident de se tourner vers ce mode de fonctionnement innovant, constatant un statu quo, voire une diminution de productivité sur leur chantier. A ne pas confondre avec un ensemble de bonnes pratiques à appliquer aux projets de construction, le Lean Construction est surtout une philosophie, une dynamique de travail dans laquelle s'inscrit toute démarche visant à remettre le projet de construction, en tant que tel, au centre des activités plutôt que de se focaliser sur des intérêts personnels.

Le Lean Manufacturing, terme employé pour la première fois par le MIT pour rebaptiser le Toyota Production System, a pour vocation de se recentrer sur les besoins du client en se focalisant sur les activités à valeur ajoutée et en tentant de réduire ou même d'éliminer toute forme de gaspillage. C'est dans cette perspective d'amélioration continue de la performance que nous nous sommes lancés dans ce travail. Aidés par la société Besix : acteur incontournable du secteur de la construction en Belgique et internationalement. Leur aide nous a permis d'avoir accès à leurs chantiers afin de pouvoir nous rendre compte de la situation sur le terrain. Dans un deuxième temps, cela nous a également permis de récolter de précieuses données permettant de mener notre travail à bien et d'aboutir aux résultats présentés.

L'objectif final de ce travail de fin d'étude était double. Le premier consistait à déterminer l'impact qu'aurait la mise en place d'un système de stockage vertical sur un site de construction. Le but recherché était d'aboutir à une économie de temps et d'espace occupé.

Le deuxième, plus théorique, s'intéressait à la phase de préparation d'un chantier et plus spécifiquement au placement des zones de stockage afin de minimiser le temps perdu en déplacement d'éléments.

L'objectif était donc, ici aussi, de dégager un gain en temps.

Ces deux propositions s'inscrivaient parfaitement dans une démarche Lean Construction, la réduction des gaspillages étant au coeur même des gains en temps et en espace potentiellement réalisés.

Au vu de nos différents résultats, nous avons pu déterminer des valeurs de gains tout à fait satisfaisantes. L'implémentation du stockage vertical sur chantier apporte, en effet, une économie de 11% à 14% sur les activités d'assemblage des ferrallages. En outre, il permet également d'économiser 30% de l'espace initialement prévu pour le stockage des aciers. Ce gain est alors à mettre à profit d'une meilleure organisation qui permet une vision claire du chantier et un travail plus rigoureux et efficace.

L'étude de cas du chantier de Melun grâce à l'algorithme de placement des zones de stockage a, quand à elle, pu mettre en évidence les matériaux dont l'emplacement de stockage s'avère déterminant sur le planning d'un projet. En fonction des différents éléments il a ainsi été montré qu'un gain allant jusqu'à 14% du temps de manutention pouvait être réalisé. Finalement, les temps de mouvements de grue, donc sans considérer le temps d'installation, peuvent aller jusqu'à 14%.

Ces résultats sont néanmoins à nuancer et à remettre en perspective. Bien que très encourageantes et sans doute (espérons le) motrices pour un futur intérêt des entrepreneurs, ces valeurs de gains restent des valeurs théoriques, obtenues sur bases d'hypothèses prises de manière objective. Le monde de la construction souffrant du manque de données enregistrées sur chantier, nous n'avions, à notre disposition, pas assez de données pour valider de façon certaine nos théories.

De plus, même en étant convaincus des avantages certains que pourrait présenter la mise en œuvre de nos deux solutions, nous avons pu nous rendre compte d'un facteur très limitant présent dans le monde de la construction qui ralentira sans doute leur application. La réticence à accepter le changement est,

en effet, une des raisons pour lesquelles l'industrie de la construction peine à se renouveler, à innover et à combler son retard de productivité sur les autres industries manufacturières. La construction étant un domaine bien (trop) connu, l'idée même de reproduire ce qui a toujours fonctionné, représente un énorme frein que notre travail tente de pointer du doigt et d'annuler en se tournant vers de nouvelles idées.

Le facteur humain joue ainsi un rôle déterminant dans notre démarche. C'est à nouveau dans cette optique que nous décrivons nos solutions comme faisant partie du Lean. En effet, en prenant nos résultats comme acquis et en appliquant nos propositions de manière mécanique, aucun résultat concluant ne sera à attendre. Il s'agit donc de les appliquer en mettant de l'énergie à vouloir impliquer tous acteurs d'un chantier autour de ce projet, de l'ouvrier au directeur de projet. Le temps étant précieux en phase d'exécution d'un chantier, il vaut parfois mieux s'arrêter et réfléchir à la meilleure manière de faire plutôt que de continuer à *reproduire ce qui a toujours fonctionné*.

Et comme le disait Henry Ford : « *Vision without execution is just hallucination.* »

Références

- [1] J. P. WAMACK, D. J. JONES, and D. ROOS, *Le système qui va changer le monde*. Dunod, 1994.
- [2] J. M. J. BUGHIN and J. WOETZEL, “Reinventing construction : A route to higher productivity,” *McKinsey Global Institute*, 2017.
- [3] V. B. T. D. KEYSER, “Marges bénéficiaires des entreprises : evolution recente dans un contexte de faible inflation,” *BNB Revue economique*, Septembre 2015.
- [4] J. F. KRAFCIK, “Triumph of the lean production system,” *Sloan Manage. Rev.*, 1988.
- [5] J. LIKER, *The Toyota Way : 14 Management Principles from World Greatest Manufacturer*. McGraw-Hill Education : New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto, 2004.
- [6] P. DUPIN, *Le Lean appliqué à la construction*. Eyrolles, 2014.
- [7] J. BICHENO, *New Lean Toolbox : Towards Fast Flexible Flow*. Picsie Books, 2004.
- [8] A. LANGE, *Lean Construction - Practical Insights for innovating Construction Management*. Impressum, 2016.
- [9] L. KOSKELA, *Foundations of Lean Construction*. Elsevier, 2002.
- [10] A. PRAMOD, “A training on 3m in lean management,” in *A training on Muda, Mura & Muri in Lean manufacturing* (Jishuken, ed.), 2015.
- [11] D. PARTNERS, “Introduction au lean construction,” in *Lean Construction*, 2015.
- [12] B. EKSTEEN and D. ROSENBERG, “The management of overhead costs in construction companies,” 2002.
- [13] OPPBTP, “Dechargement, manutention et stockage des armatures sur les chantiers du batiment,” *Fiches de prevention du BTP*, 2013.
- [14] J. DITRICHSTEIN, “De la conception à la mise en oeuvre,” *AFCAB et CIMBETON*, Septembre 2005.
- [15] K. K. Y. SUGIMORI and F. CHO, “Toyota production system and kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human system,” *International Journal of Production Research*, 2007.
- [16] A. DESAI and M. J. SHELAT, “Value stream mapping as a lean construction tool – a case study,” *International Journal of Engineering Research & Technology*, December 2014.
- [17] N. VILASINI and J. GAMAGE, “Implementing value stream mapping tool in the construction industry,” *International Research Conference on Sustainability in Built Environment*, June 2010.
- [18] C. CHENG and S. KUMAR, “A bim-based framework for material logistics planning,” *Proc. 23rd Ann. Conf. of the Int’l Group for LEan Construction*, pp. 33–42, July 2015.
- [19] X. NING, K. LAM, and M. LAM, “A decision-making system for construction site layout planning,” *Automation in Construction*, 2010.

Annexes

A Visites d'entreprises

A.0.1 Holcim

Retour sur notre visite d'Holcim

Contact : Fabrice S. Performance Manager

Problèmes constatés par Holcim :

- Qualité du béton demandé (s3) et veulent une qualité de s4 sans payé plus cher l adjuvant et rajout donc de l'eau dans le beton → problème d'homologation Benor, et de qualité en rajoutant de l'eau.
- Attente des chauffeurs qui impacte les autres chantiers
- Opération avec cuffa dangereuse pas d'opérateur
- Eux ils appellent et traquent leur camion via Tomtom
- Problème avec la location des pompes (300 eur), certains vidangent avec des brouettes, pas précis dans la location
- Fort dépendant du planning du chantier, du cubage (parfois 1 jour avant ils ne savent pas la quantité)
- Aucun effort de compréhension entre comment le chantier fonctionne et eux fonctionnent (heures d'ouverture, etc)
- Accueil du camion, circulation sur chantier
- Taille du camion adapté au chantier
- 100 min à partir du moment où il part
- Autorisation de police pour stationnement des camions

→ prévoir un cubage au jour le jour par zones

→ circulation

→ règles et procédures à respecter (grutier bien formé)

→ respect du béton défini

→ solution pour remplacer le cuffa ? monture d'attente pour cuffa – poste de dechargement

A.1 IKEA

Retour sur notre visite d'Ikea

Etiquette/tag :

Pleins d'informations mais l'information la plus importante pour le client est mise en grand et colorée.
Plusieurs moyens de vérification que c'est bien le bon produit (couleur, code, allée, rangée)

Circulation :

- Plan de circulation à sens unique.
- Flèches
- Délimitation de l'espace de circulation par des traits et une couleur différente
- Tout est indiqué et évident, pas besoin de poser des questions
- On ne revient jamais sur ses pas
- Beaucoup d'objets roulants
- Zone où tu peux trouver de l'information sont concentrées, zones d'intérêt logistique bien définies
- Tapis roulant pour débarrasser en cuisine

Stockage

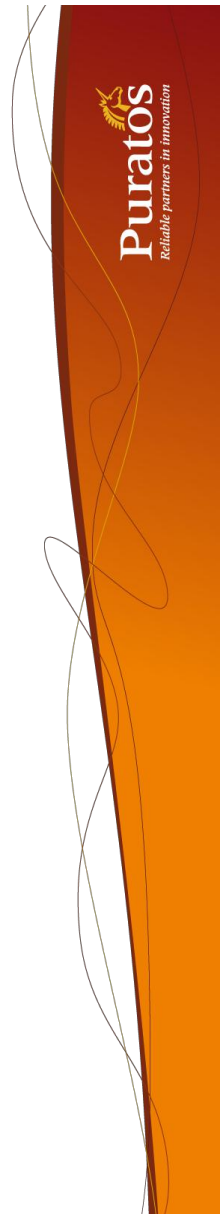
- Stockage extrême en hauteur
- Deux façon de stocker : 2 premiers niveaux axés client, le reste logistique
- Chaque emplacement à un code barre
- Zones identifiées en x,y,z
- Beaucoup de stocks : pourquoi ?
- Ranger par collection
- Utilisation poussée des appareils digitaux (scan pour inventaire, grande base de données,..)

A.2 Puratos



Agenda

Mardi, 4 avril 2017 – Salle Harmony			
Heure	Présentateur	Fonction	Sujet
09:00 – 10:00	John Yaranossian	Business Process & Continuous Improvement Manager	Lean project "Customer Information Request" (flux administratif) → Optimisation en cours du processus de demande client d'information et de documentation en utilisant la méthode Lean
10:00 – 10:30	Damien Lelangue	Team leader Poudres	Lean project L70 (flux physique) → Optimisation du projet sur la ligne 70
10:30 – 12:00	Pierre Bles	Warehousing & Distribution Manager	Flux logistiques internes et gestion de magasin → Gestion des produits finis
12:00 – 12:30	Dirk D'haeseleer	Demand & Supply Planning Manager	Flux logistiques internes → Gestion des matières premières et emballages



A.2.1 CSTC

Retour sur notre visite au CSTC

Contact : Florent Suain - Conseiller principal senior

- Notre travail se focalise sur les chantiers MAIS ne pas oublier toute la préparation qui est censé se passer en amont dans les bureaux
- Demander de jeter un oeil au manuel qualité concernant la préparation des chantiers BESIX
- Interview/visite au département méthode et planning chez BESIX
- OK pour ne se concentrer que sur le gros oeuvre. Ca semble pertinent et réaliste par rapport au temps à disposition

- Analyse par VSM → prendre les livraisons comme point de départ
- 2 possibilités :
 - contexte global en considérant le stock comme système
 - contexte spécifique en se basant sur quelques matériaux
- UrbanWise : Site web développé par le CSTC afin de régler tous les problèmes de communication entre les fournisseurs et les (co)contractants → Voir fichier Excel
- Success, projet du IFSB → Contacter la personne responsable et demander un rdv!!!
- Ca peut être intéressant de rajouter un aspect financier à notre future étude afin de rajouter du crédit aux recommandations (ex. stockage en hauteur)

B Liste de solutions par type de gaspillage

1. SURPRODUCTION

But : meilleure extraction des quantités, réutilisation et recyclage, assurer la qualité du travail

- (a) Passer de la gestion de projet sur papier à une digitalisation complète.
- (b) Digitalisation par une plateforme disponible sur smartphone qui intègre le reporting des défauts et des quantités, le planning etc.
- (c) Recyclage des déchets et valorisation en décrivant visuellement comment trier les déchets
- (d) Création et maintien d'un environnement propre qui force à la minutie (Tesla avec ses usines toute blanche)
- (e) Prévoir un cubage au jour le jour par zones
- (f) Le BIM peut être intégré avec GIS (Geographic information system) pour traquer les états des supply chain et émettre des signaux d'alerte pour permettre la livraison de matériel.
- (g) Mettre en place une gestion des déchets structurée, utilisation de bennes avec des codes couleur et se mettre d'accord avec les sous-traitants sur leur gestion des déchets

2. ATTENTES

But : réduire les attentes au minimum, induire le minimum de personnel dans l'opération

- (a) Implémentation d'une puce GPS/radio (peut se faire avec le GSM du conducteur) ainsi lorsque le camion est dans un rayon de 1-2 km l'information est envoyée à la personne responsable de la réception du camion et il peut dès lors préparer le matériel en avance assurant une fluidité du flux.
- (b) Avant de commencer les opérations de la journée, le matériel doit être prêt. Chaque jour le responsable de l'équipe décrit les équipements qu'il aura besoin sur papier (ou mieux, digitalement). Ainsi les conflits peuvent être détectés plus vite et les temps seront réduits.
- (c) Préfabriqué au maximum que cela soit dans une usine dans sous-traitant ou sur chantier en créant une zone de préfabrication.
- (d) Communication par radio
- (e) Fonctionner en micro-zoning

- (f) Utiliser des engins plus compactes, plus flexibles comme des clarks/manitou pour être moins dépendants de la grue (il faut donc s'assurer d'un terrain stable pour qu'ils puissent rouler)
- (g) Briefing clair des objectifs journalier en début de journée pas juste continuer ce qu'on a fait hier
- (h) Analyser le schéma des grues, leur saturation. Etablir une réflexion critique sur leur utilisation.
- (i) Revoir le planning assez souvent pour permettre d'éviter la zone de stockage, rendre possible le Just-in-Time
- (j) Solution pour remplacer le cuffa ou monture d'attente pour cuffa – poste de déchargement

3. LOGISTIQUE

But : fluidifier le transport interne et externe

- (a) Circuit logistique interne sur le chantier en sens unique pour éviter les manœuvres des camions, entrée et sortie différentes.
- (b) Zones de chargement et déchargement bien définies.
- (c) Futuriste : tout comme Amazon le fait dans ses centres de traitements, des robots autonomes se chargent de dispatcher le matériel sur le chantier.
- (d) Améliorer la qualité du sol où les camions se déplacent et améliorer la propreté du chantier pour le déplacement des ouvriers.
- (e) Plan de circulation avec de meilleurs pictogrammes, signalisation.
- (f) Création pour plusieurs chantiers dans un rayon réduit d'un centre de traitement avant l'envoi sur site.
- (g) Beaucoup de matériaux aux abords du chantier alors que le flux normal serait de stocker, déplacer et mettre en place directement → fonctionner en base de données, chaque opération est décrite en fonction de ses matériaux, outils et date d'exécution
- (h) Intégrer des zones tampons dans le planning pour ranger.
- (i) Dégression de la taille des outils quand les quantités diminuent. (grue pour tout le lot, clarks pour moins, un élément pour l'ouvrier)
- (j) Sécurité renforcé par des pictogrammes revus et facilement compréhensibles
- (k) S'assurer que toutes les autorisations de police ont été reçues

4. SUR-QUALITÉ

But : réduire le coût de contrôle par rapport à la qualité obtenue

- (a) Des tableaux récapitulatifs automatiques reprenant des valeurs clés disposés à l'entrée du chantier à la vue de tous.
- (b) Utilisations de capteurs sur les structures mesurant vibrations, les mouvements de stocks, l'entrée et sortie de camion etc.
- (c) Les ouvriers sur site gèrent la qualité des ouvrages réalisés. Ils ont des formations continues pour détecter des défauts dans la qualité. Ouvrier qualifié
- (d) Retour d'expérience
- (e) Garder une base de données de tous les camions qui rentrent
- (f) Amélioration de la communication, que chaque personne soit assurée de recevoir l'information entre la personne N+1 et N-1.

5. STOCKAGE

But : réduire la quantité de stock et son espace sur chantier, les mouvements de stocks et améliorer l'inventaire

- (a) Zone de stockage sur plusieurs niveaux, en plusieurs zones identifiées grâce à des code barres et chaque fois qu'un élément y est pris il faut scanner le code barre pour créer un inventaire automatique.
- (b) Zone de stockage visuellement organisée avec des couleurs comme IKEA avec des codes pour la localisation, des allées et des flèches directionnelles.
- (c) Au lieu d'avoir une grosse zone de stockage, en organiser tout autour du chantier
- (d) NFC-RFID utilisé pour taguer le matériel et le traquer.
- (e) Création d'un centre de distribution pour plusieurs chantiers pour réduire la dépendance face aux fournisseurs, mieux organiser les stocks, réduire le trafic.
- (f) Utilisation de tag visuel Kanban où l'on décrit le produit, l'utilisation, la localisation, etc. Peut être relié à une plateforme en ligne de gestion de projet où l'ouvrier scanne le code barre et ainsi l'inventaire est automatiquement mis à jour. Visuellement on peut aussi taguer avec une couleur les éléments qui montre que le stock est réduit.
- (g) Étiquette sur chaque élément où les informations sont classées suivant des couleurs

- (h) Création de différents types de stockage (immédiat, pour un plus long terme)
- (i) Avoir une zone de stockage dynamique qui se déplace et évolue suivant l'avancement du chantier

6. DÉPLACEMENTS

But : réduire le déplacement d'ouvriers, d'outils et de matériel

- (a) Chaque équipe dispose d'un chariot qu'elle déplace avec elle tout au long du chantier.
- (b) Ajout d'objets roulants
- (c) Zone d'information sont concentrées
- (d) Rangement au bon endroit et rangé au bon endroit suivant une base de données
- (e) Fonctionnement par zone
- (f) Utilisation à 100% des compétences des ouvriers : un maçon fait un mur et ne va pas chercher les briques.

7. DÉFECTUEUX

But : réduire le rework

- (a) Utilisation de capteurs sur les machines/entretien pour prévenir des dégâts éventuels.
- (b) Utilisation de lidar – light detection and ranging – sur un drone par exemple pour l'étude du terrain, peut aussi être utilisé pour le progrès.
- (c) Les ratés doivent être évacués et rapportés dans une base de données.
- (d) Communiquer l'origine des ratés et les solutions qui ont été mises en place
- (e) Respect du type de béton utilisé si s4 ne pas prendre du S3 et ajouter de l'eau
- (f) Etablir des procédures de sécurité. Ex : grutier qui amène un cufa, il faut un opérateur en dessous et pas juste le chauffeur.

8. POTENTIEL HUMAIN NON UTILISÉ

But : tout le monde est utilisé à 100%

- (a) Planning à court terme mieux détaillé avec objectifs par jour pour chaque personne

- (b) Changer la façon de planifier d'un planning séquentiel en planning complexe avec beaucoup d'activités simultanées
- (c) Optimisation de l'utilisation des personnes : rapport utilisation/coût/temps utilisé
- (d) Affichage des plannings et objectifs jour/semaine/mois

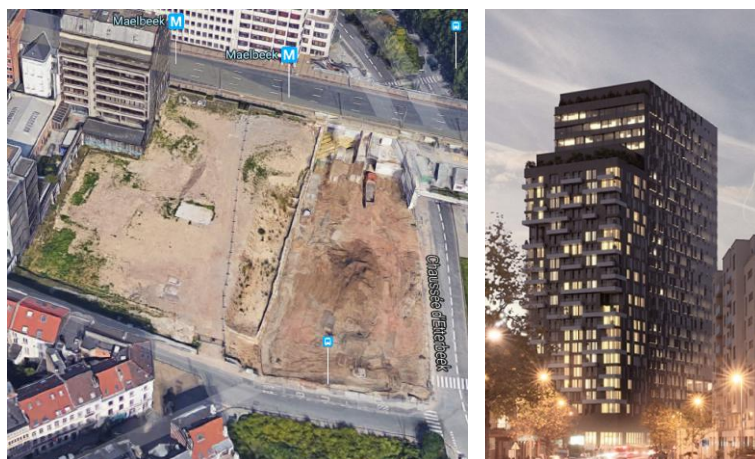
9. DÉBROUILLE

But : assurer un environnement de qualité et sûr

- (a) Observer les outils créés par les ouvriers et en construire des réutilisables.
- (b) Zones de travail identifiées

C Débriefing des visites de chantier

C.1 "The One" (Valens) - Bruxelles Ville



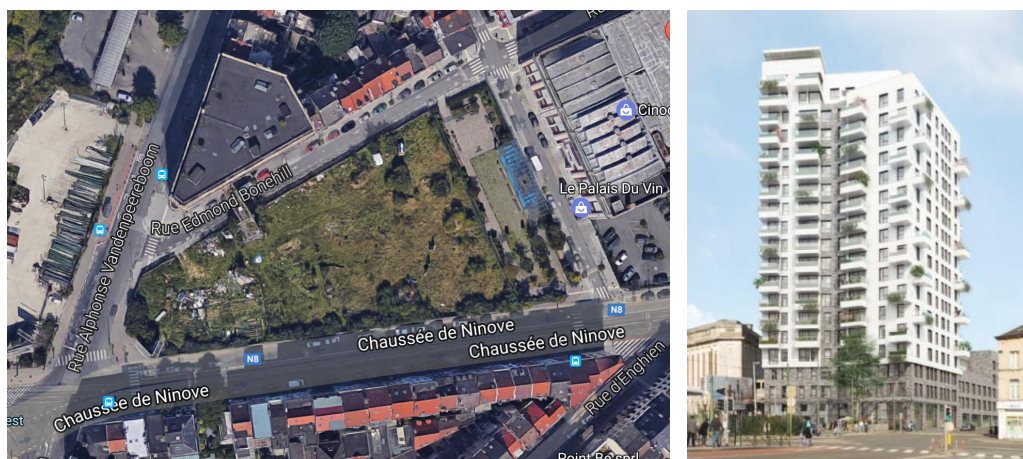
Site de construction et rendu du projet The One

Description	
Localité	Rue de la Loi, Bruxelles Ville
Résumé	Implanté en plein Quartier européen, le projet THE ONE, Brussels Europa permet de concentrer, sur un même périmètre, une mixité de fonctions porteuses de dynamisme et de convivialité. Le projet propose un ensemble mixte de bureaux, logements et commerces, avec une attention toute particulière à l'aménagement d'espaces publics, et contribue ainsi au redéveloppement de ce quartier stratégique pour Bruxelles.
Surface	97 appartements et 29 511m ² de bureaux ; La surface totale est de 55 400 m ²
Budget	60 400 000€
Dates	<ul style="list-style-type: none">· Début : 5 août 2015· Livraison : 3^{ème} trimestre 2018

Observations

- Vu le planning serré, l'entrepreneur a choisi de réaliser la technique du stross. Cette technique, contrairement aux méthodes classiques, consiste à pouvoir monter la structure en même temps que creuser les sous-sols du futur bâtiment.
- Le chantier a eu la chance d'avoir un terrain vague disponible juste à côté. Ils ont ainsi pu en faire une grande zone de stockage mais peut être même trop grande. Le stock d'acier est spécialement impressionnant mais très désordonné et beaucoup de temps semble perdu à retrouver les bons lots de livraison.
- Auncunes méthodes pouvant être qualifiée de LEAN n'est appliquée sur le chantier. Les efforts et initiatives afin de doper la productivité et l'efficacité viennent du directeur de chantier ou des conducteurs mais qui ont du mal à les transmettre aux hommes car la communication est relativement compliquée. (sous traitance étrangère ne parlant pas français)
- Etant donné l'immense stock, 2 engins roulant type «Manitou» sont présent dans la zone de stockage pour aller chercher les matériaux nécessaire et les amener à la grue. L'utilisation de ces machines représente un coût supplémentaire et apparait comme une solution au problème de sur-stock plutôt qu'un réel avantage pour le chantier.

C.2 "Ekla" (Besix) - Molenbeek



Site de construction et rendu du projet Ekla

Description	
Localité	Rue Edmond Bonehill, Molenbeek Saint-Jean
Résumé	Le maître d'ouvrage Re-Vive investit dans la transformation durable de terrains vagues pollués. Le terrain qui accueillait la brasserie Vandenneuvel est en friche depuis plusieurs décennies. Fort d'un programme durable et polyvalent, le projet EKLA devrait insuffler une nouvelle vie au quartier de la Gare de l'Ouest. <i>EKLA compte 92 appartements, un supermarché de proximité Okay, une école maternelle et primaire néerlandophone, une crèche, de petits espaces de bureaux et un nouveau parc de quartier. En outre, le projet dispose d'un parking souterrain pouvant accueillir plus de 100 voitures et de 200 vélos. Tout est ainsi à portée de main.</i>
Surface	La surface au sol est de 6000 m ² et environ 25 000m ² bâti
Budget	25 000 000€
Dates	<ul style="list-style-type: none"> · Début : mi-2015 · Livraison : fin 2018

Observations

- Pas de gestion systématique du stock car pas de magasinier. Le budget ne le permet en général pas (en Belgique) et la gestion quotidienne du stock revient donc en général à un des conducteurs de chantier.
- Le stock en gros oeuvre se limite à :
 1. Prédalles
 2. Prémurs
 3. Poutres
 4. Aciers
 5. Coffrages
 6. Consommables (bois)
 7. Containers à déchets
- Le stock d'acier n'est pas fait par étage mais est planifié dans le temps (+- 1 mois)
- Le manque de place impose de devoir ajuster les livraisons jusqu'au dernier moment (impose une grande flexibilité du fournisseur qui ne peut pas toujours se le permettre). Le chantier a de grandes exigences que les fournisseurs ne peuvent pas toujours satisfaire.
- Le manque de place impose de devoir faire du «Just-in-Time» mais qui n'est pas toujours très efficace → plusieurs camions en même temps attendant d'être déchargés. Le conducteur préférera tout de même faire patienter les camions plutôt que de les décharger sur une zone temporaire ce qui engendrerait des coûts de manutention... L'idéal est de pouvoir stocker les remorques de camion. (si assez de place)
- Les livraisons se font tous les jours pour respecter ce modèle de Just-in-Time.
- Ils essaient de saturer la grue au maximum mais certains aléas empêchent parfois de les utiliser. (p.ex : vent)
- Stockage vertical → Faire très attention à la sécurité et gérer la différence de taille des éléments. (système adaptable afin de bien les fixer?)
- Ici, augmenter le stock ne serait pas une bonne solution selon le conducteur car la place ne le permettrait pas et même avec une possibilité de stockage vertical, il préfère le JIT pour des raisons de coût et de temps de manutention.
- Avancée du gros oeuvre =1 étage/6 jours
- Pas la place pour un «Manitou» mais dans tous les cas ça ne serait pas une idée envisageable puisque ça détruit les pistes.

C.3 "Saint-Boniface" (Jacques Delens) - Ixelles



Site de construction et rendus du projet Saint-Boniface

Description	
Localité	Rue de la Source, Ixelles
Résumé	L'école Saint-Boniface construit un nouveau bâtiment de 4 étages comprenant un réfectoire de repas chaud avec cuisine avoisinant, un réfectoire de repas froid, des salles de classe ainsi que des nouveaux bureaux. Ce nouveau bâtiment sera relié au bâtiment existant par un tunnel souterrain de quelques 40 mètres de long.
Surface	La surface au sol est de 550 m ² et environ 2500m ² bâti
Budget	N.C
Dates	<ul style="list-style-type: none">· Début : 29 août 2016· Livraison : septembre 2017

Observations

- Pas beaucoup de place
- Petite zone de préfabrication à l'arrière et occupation d'une partie de la route en façade (2 €/heure et m^2)
- Même considération que EYKLA : stocker sur des remorques de camion est l'idéal car pas de manutention nécessaire.
- Les murs sont montés en blocs de silico → les palettes sont déchargées à la rue et ensuite montées avec la grue au bon étage avant de couler la dalle et de "fermer" l'étage.
- Les commandes sont faites afin de remplir un camion de 15-20T.
- Zone de stockage :
 1. Bois
 2. Aciers
 3. Panneaux de coffrage
- La sécurité de la zone de stockage est gérée par du balisage et du management visuel. On dépose où il y a de la place, les zones ne sont pas plus réfléchies que ça.
- La zone de stockage est repensée au cours du projet mais il s'agit de moins la bouger possible afin de limiter le temps "perdu". (c'est du moins leur idée...)
- Beaucoup de chantiers coulent une petite dalle de béton afin de leur permettre de travailler à plat.
- L'emplacement de la zone de stockage est fort basé sur l'expérience et sur des règles informelles de bon sens, rien n'est formalisé Ils ne sauraient pas distinguer une meilleure installation d'une autre sans la voir en pratique. Le mot d'ordre pour eux est de stocker là où il y a de la place.
- Coût des baraquements : 50 000 €.

C.4 "Foestraets" (Sud Construct) - Uccle



Site de construction du projet Foestraets

Description	
Localité	Avenue Foestraets, Uccle
Résumé	Construction de deux petits immeubles dans un quartier très résidentiel. Ces immeubles sont en partie destinés à des logements et à des bureaux/cabinets pour la pratique de professions libérales
Surface	La surface au sol est d'environ 500m ² et environ 2000m ² bâti
Budget	N.C
Dates	<ul style="list-style-type: none">· Début : 2016· Livraison : 2017

C.5 "City Dox" (Besix) - Anderlecht



Site de construction et rendu du projet City Dox

Description	
Localité	Boulevard Industriel, Anderlecht
Résumé	Implanté à Anderlecht, le long du canal Bruxelles-Charleroi, le projet City Dox s'inscrit pleinement dans une dynamique de développement urbain durable. Nos équipes ont eu l'opportunité de concevoir ce projet à partir d'une page blanche. Sur un vaste terrain de 5,4 hectares, libre de toute occupation, nous avons créé, avec des architectes et des urbanistes, un projet urbain novateur aux fonctions multiples.
Surface	40 000m ² bâti
Budget	N.C
Dates	<ul style="list-style-type: none"> · Début : septembre 2016 · Livraison : début 2018

Observations

- Trois visites ont été effectuées : en février, en avril ainsi qu'en mai.
- Chantier disposant de beaucoup d'espace et de nombreux points d'approvisionnement possibles
- Lors de la première visite, le chantier avait deux mois de retard, principalement dus à des terres plus polluées que prévues qui devaient être évacuées. De plus, les zones de stockage étaient très mal entretenues, les zones de circulation non signalées et non-praticables. Cependant, lors de la deuxième visite, tous les défauts cités précédemment étaient corrigés.
- Les hourdis sont mis directement, tandis que les prémurs sont stockés sur des racks, les poutres préfab sont stockées aussi.
- Les zones intérieures de stockages ne sont jamais mentionnées alors qu'ici la surface du jardin suspendu du 1er étage est très importante.
- Zones de déchargement non définies
- 1 étage toutes les 3 semaines
- La qualité reste le problème sachant qu'ils travaillent avec des sous-traitants principalement.
- Il manque la moitié des cotes sur les plans
- Il y a 7 heures d'utilisation de la grue sur 10 heures sur une journée avec généralement 5 heures de préfab, 2h de bétonnage. Mais c'était trop pour les sous-traitants même avec ces 3 heures de réserve.
- 20 min par prédalles

C.6 "Canal District" (Jacques Delens) - Anderlecht



Site de construction et rendu du projet Canal District

Description	
Localité	Rue Antoine Dansaert, Bruxelles Ville
Résumé	Situé au coeur de Bruxelles, le projet Canal District vise à rénover tout un quartier en proposant 205 nouveaux appartements (allant du studio aux logements 3 chambres). Le projet vise aussi à rénover des maisons et construira une crèche ainsi qu'environ 250m ² de commerces.
Surface	19 200m ² bâti
Budget	22 000 000€
Dates	<ul style="list-style-type: none"> · Début : 2016 · Livraison : Octobre 2017

Observations

- Chantier très urbain avec peu de stockage à l'extérieur
- Mise en place du Lean avec par exemple des chemins de circulation dessinés sur le sol, des zones de stockage délimitées par sous-traitants, etc. Le Lean fonctionne très bien sur ce chantier et les acteurs sont satisfaits (augmentation de la productivité, réduction de planning et donc des coûts).
- 3 à 4 mois gagnés grâce à son implémentation
- Ils ont d'abord perdu pleins de temps car énormément de choses n'étaient pas pensées en phase de préparation.

C.7 "Jardin de l'Orne" (Besix) - Mont-Saint-Guibert



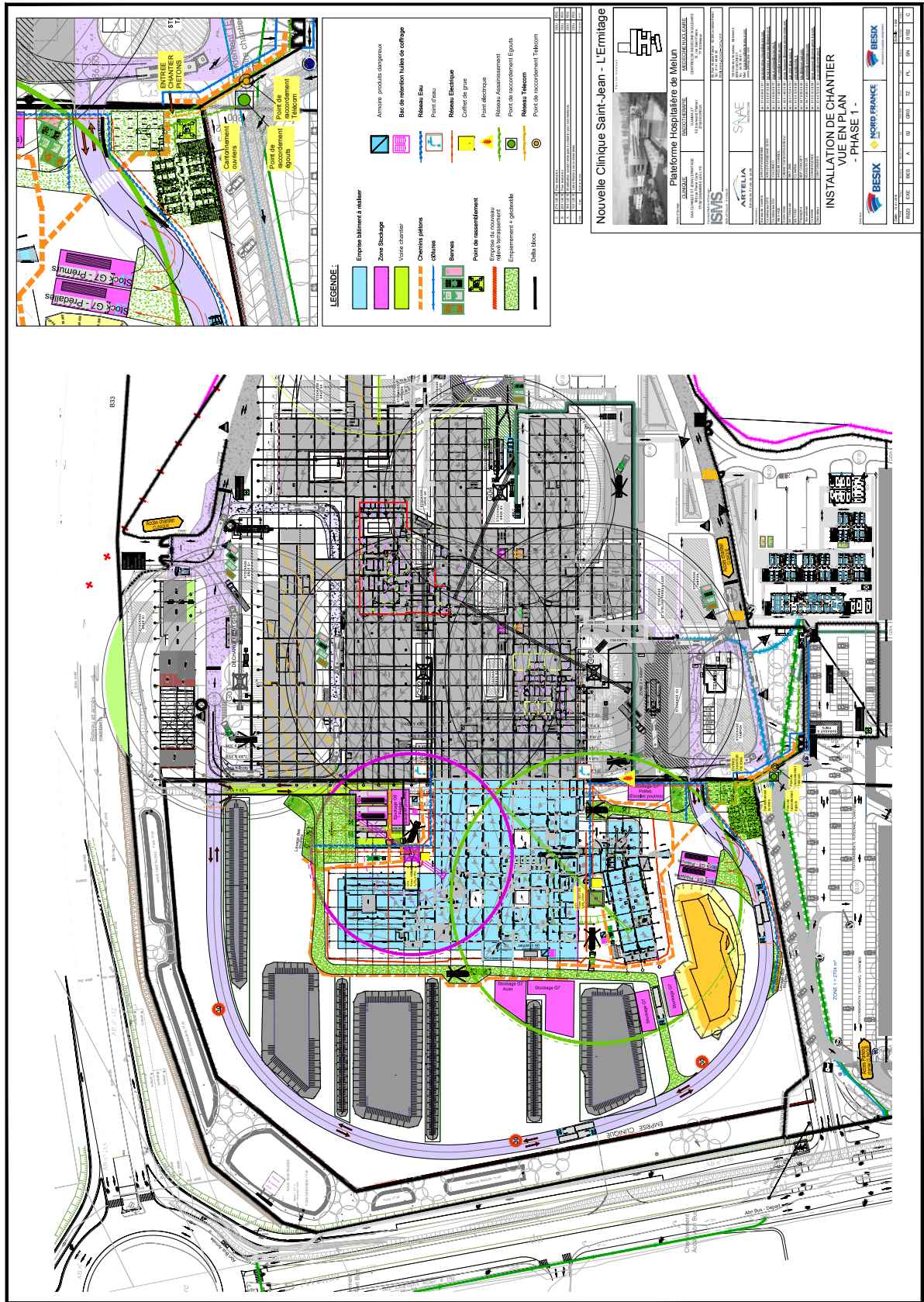
Site de construction et rendus du projet Jardins de l'Orne

Description	
Localité	Mont-Saint-Guibert
Résumé	Niché à un jet de pierre de Louvain-la-Neuve et des principaux pôles d'attractivité du Brabant wallon, ce quartier est propice à la détente et aux activités en tout genre. Idéal pour les jeunes ménages, les seniors et les familles, il est votre avenir grandeur nature. Le tout à des tarifs très abordables pour la région.
Surface	N.C
Budget	N.C €
Dates	<ul style="list-style-type: none"> · Début : N.C · Livraison : N.C

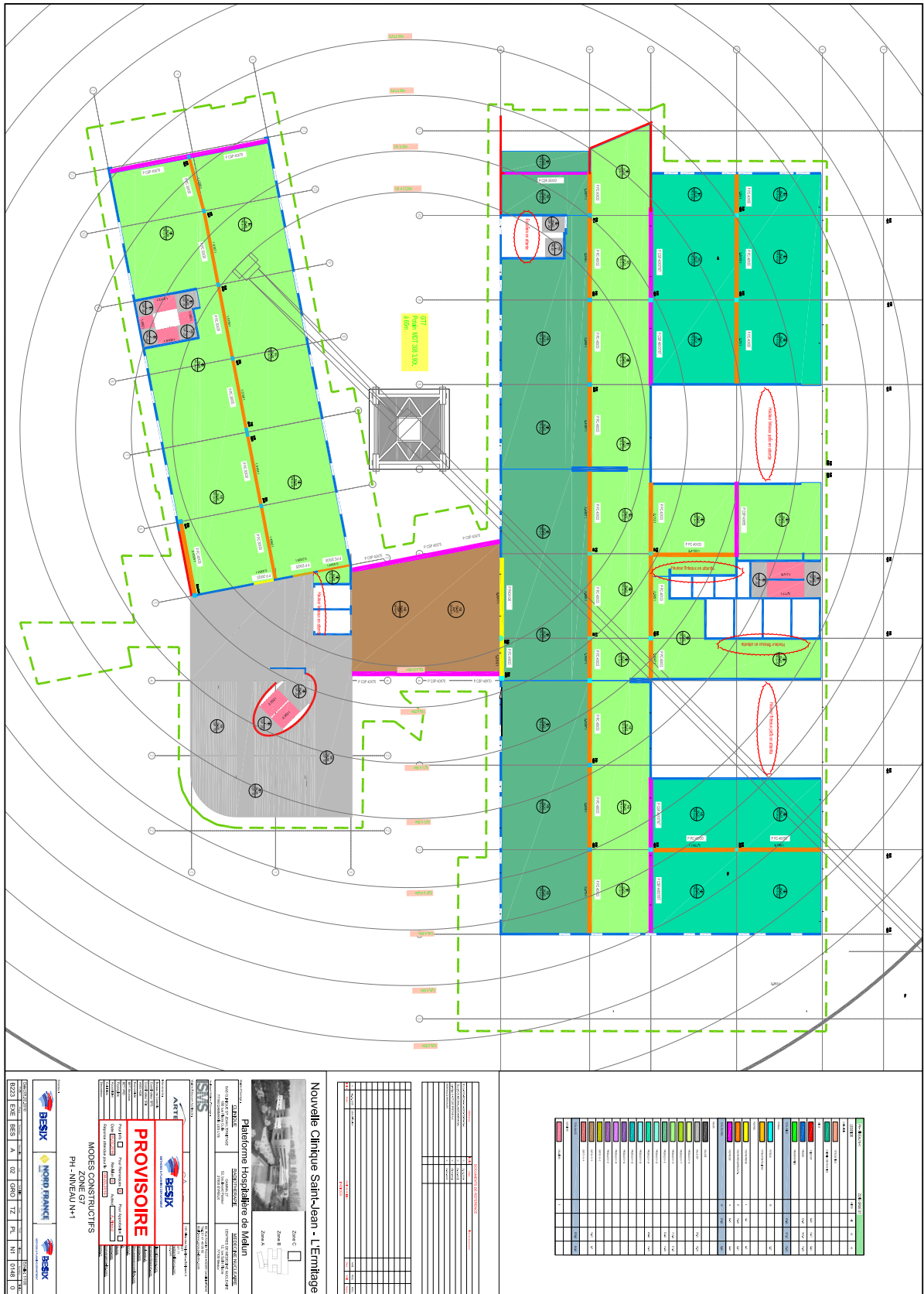
D Documents Plateforme hospitalière de Melun

Les documents sont ici pour illustration mais sont consultables en ligne sur le lien privé : <https://drive.google.com/drive/bmdMSkJfbFBycjQ?usp=sharing>

D.1 Plan d'installation



D.2 Mode constructif



PH - NIVEAU N+1		ZONE GRUE G7			
LEGENDE		UNITES	m1	m2	m3
FONDATEMENTS					
	TETES DE PIEUX				
	LONGRINE / BECHE DE RIVE				
VOILES					
	VOILES CSP		46.06	174.17	32.43
	PREMUR		432.40	1497.34	119.09
	PREMUR MATRICE				
TOTAL VOILES			478.46	1671.51	151.52
POTEAUX					
	POTEAUX	28			12.27
	POTEAUX METALLIQUES				
POUTRES					
	POUTRE PREFAB	4	14.7		6.27
	POUTRE PREFAB PRECONTR.	27	174.88		23.61
	POUTRE CSP	14	85.25		20.98
TOTAL POUTRES		45	274.83		50.86
DALLES					
	DALLAGE				
	DALLE CSP			299.51	192.54
	PREDALLE 6 + 14				
	PREDALLE 6 + 17				
	PREDALLE 6 + 19			1113.42	211.55
	PREDALLE 6 + 21			532.83	111.89
	PREDALLE 6 + 19			1113.42	211.55
	PREDALLE 6 + 21			532.83	111.89
	PREDALLE 6 + 22				
	PREDALLE 6 + 24			496.98	119.76
	PREDALLE 6 + 26				
	PREDALLE 6 + 29				
	PREDALLE 6 + 34				
	PREDALLE 6 + 44				
	PREDALLE 8 + 37				
	DAP 20 + 5 + 2				
	DAP 24 + 5 + 3			134.21	6.71
	DAP 27 + 5 + 4				
TOTAL DALLES				2578.95	642.45

D.3 Métré opérationnel

		CLINIQUE MELUN				METRES / CADENCES				
		BAT B1 - N+1				QUANTITES				
			HT	EPAIS.		U	ML	M²/face	M3	
VOILES	VOILES EXTERIEURS (HT ≤ 4,30m)									
		3.91	0.20		1.00	0.65	2.54	0.51		
		3.91	0.20		3.00	43.60	170.47	34.09		
		4.16	0.20		16.00	139.25	579.28	115.86		
	TOTAL VOILES EXT + HT et EPAISSEUR MOYENNES	4.10	0.20			183.50	752.29	150.46		
	VOILES PREMUR SH (HT ≤ 3,80m)									
		4.16	0.20	0.12	1.00	3.30	13.73	1.10		
		4.16	0.20	0.12	22.00	97.63	406.12	32.49		
		5.14	0.20	0.12	1.00	15.20	78.13	6.25		
	TOTAL PREMUR	4.29	0.08		24.00	116.13	497.98	39.84		
TOTAL VOILES :					24.00	299.62	1250.27	190.30		
P O D P O T E A U X	MANNEQUINS		0.50	0.20		1.00	2.70	1.35	0.27	
	POTEAUX RECTANGULAIRES									
				Section						
		2.51	0.40	0.41	1.00		2.03	0.41		
		3.11	0.30	0.30	1.00		1.87	0.28		
		3.11	0.40	0.40	2.00		4.98	1.00		
		3.26	0.40	0.40	2.00		5.22	1.04		
		3.56	0.40	0.20	2.00		4.27	0.57		
		3.56	0.40	0.40	5.00		14.24	2.85		
		3.58	0.40	0.40	1.00		2.86	0.57		
TOTAL POTEAUX RECTANGULAIRES				14.00		35.47	6.72			
POTEAUX CIRCULAIRES										
			Section							
	2.51	diamètre:	0.50	1.00		3.94	0.49			
	3.56	diamètre:	0.40	2.00		8.94	0.45			
	3.58	diamètre:	0.40	1.00		4.50	0.45			
TOTAL POTEAUX CIRCULAIRES				4.00		17.38	1.39			
TOTAL POTEAUX :					18.00			8.11		
P O U T R E S	POUTRES PREFA PRECONTR.									
	Ep plancher	Largeur	Hauteur Totale	LG DEV/ML	HT / R	U	ML Total	M² Dev	M3	
	0.00	0.40	0.33	1.06	0.33	10.00	67.56	71.61	8.92	
	0.00	0.40	0.33	1.06	0.33	4.00	24.91	26.40	3.29	
	0.00	0.40	0.50	1.40	0.50	5.00	33.90	47.46	6.78	
	TOTAL POUTRES PREFA					19.00	126.37	145.48	18.99	
	POUTRES TRADI									
	Ep plancher	Largeur	Hauteur Totale	LG DEV/ML	HT / R	U	ML Total	M² Dev	M3	
	0.00	0.20	0.35	0.90	0.35	2.00	13.81	12.43	0.97	
	0.00	0.20	0.37	0.94	0.37	1.00	15.82	14.87	1.17	
0.00	0.25	0.43	1.11	0.43	1.00	7.70	8.55	0.83		
0.00	0.40	0.55	1.50	0.55	1.00	6.77	10.15	1.49		
0.00	0.20	0.65	1.50	0.65	2.00	14.01	21.02	1.82		
0.00	0.20	0.67	1.54	0.67	1.00	16.02	24.66	2.15		
TOTAL POUTRES TRADI					7.00	58.10	91.67	8.42		
POUTRES PREFAB CHANTIER										
			LG DEV/ML					M² Dev	M3	
	0.40	1.38	3.16		2.00	11.03	34.86	6.09		
TOTAL POUTRES PREFAB CHANT.					2.00	11.03	34.86	6.09		
P L A N C H E R S	PLANCHER TRADI									
				HT	EPAIS.			M² total	M3	
				0.20	0.20			4.76	0.95	
				0.20	0.20			14.93	2.99	
				0.27	0.27			14.61	3.94	
	TOTAL PLANCHER TRADI					0.23	Ep Moyenne	34.30	7.88	
	PREDALLE									
	Ep Pré dalle	Ep Totale	Portée Moyenne	Largeur	HT	D Compr	Nb		M² total	M3 comp
	0.06	0.30	8.00	2.40	0.27	0.24	26.00		498.98	119.76
	0.06	0.27	8.00	2.40	0.27	0.21	27.00		518.22	108.83
0.06	0.25	8.00	2.40	0.27	0.19	31.00		577.28	109.68	
0.06	TOTAL PREDALLES				0.21	84.00		1594.49	338.27	
TOTAL PLANCHERS :								34.30	7.88	
TOTAL PLANCHERS - TREMIS :								34.30	7.88	
E S P R E	AUTRES OUVRAGES		HT	EPAIS.	Largeur	U	ML	M² total	M3	
	ESCALIERS PREFA					6.00				

AAB REV A 26.04.2016		CLINIQUE MELUN			METRES / CADENCES					
		BAT A N+1			QUANTITES					
		HT	EPAIS.		U	ML	M²/1face	M3		
VOILES	VOILES EXTERIEURS (HT ≤ 4,30m)									
			2.60	0.15		1.00	0.31	0.80	0.12	
			2.60	0.30		1.00	3.24	8.42	2.53	
			3.20	0.20		2.00	13.74	43.98	8.80	
		TOTAL VOILES EXT + HT et EPAISSEUR MOYENNES	3.08	0.22			17.29	53.21	11.44	
		VOILES COURBES								
			3.32	0.15		17.00	14.44	47.93	7.19	
		TOTAL VOILES COURBES + HT et EPAISSEUR MOYENNES	3.32	0.15			14.44	47.93	7.19	
		Acrotères								
			0.96	0.16		1.00	13.26	12.73	2.04	
	TOTAL PREFA	0.96	0.16		1.00	13.26	12.73	2.04		
	VOILES PREMUR SH (HT ≤ 3,80m)									
				H T	EPAIS.TOT	EP peau T				
		2.95	0.16	0.12	2.00	3.22	9.50	0.38		
		2.95	0.20	0.12	3.00	12.15	35.84	2.87		
		3.20	0.20	0.12	14.00	92.31	295.39	23.63		
	TOTAL PREMUR	3.16	0.08		19.00	107.68	340.73	26.88		
	TOTAL VOILES :				20.00	152.67	454.59	47.55		
POTEAUX	MANNEQUINS		2.36	0.20		17.00	25.50	60.18	12.04	
	POTEAUX RECTANGULAIRES				Section					
			2.50	0.40	0.30	1.00		1.75	0.30	
			2.60	0.40	0.27	1.00		1.74	0.28	
			2.60	0.40	0.40	2.00		4.16	0.83	
			2.60	0.45	0.25	1.00		1.82	0.29	
			2.65	0.40	0.30	6.00		11.13	1.91	
		TOTAL POTEAUX RECTANGULAIRES				11.00		20.60	3.61	
		TOTAL POTEAUX :				11.00			3.61	
	POUTRES	POUTRES PREFA PRECONTR.								
Ep plancher		Largeur	Hauteur Totale	LG DEV/ML	HT / R		U	ML Total	M² Dev	M3
0.00		0.30	0.30	0.90	0.30		6.00	38.67	34.80	3.48
0.00		0.20	0.30	0.80	0.30		1.00	2.90	2.32	0.17
0.00		0.40	0.35	1.10	0.35		1.00	6.75	7.43	0.95
		TOTAL POUTRES PREFA					8.00	48.31	44.54	4.60
POUTRES PREFA CHANTIER										
				LG DEV/ML					M² Dev	M3
		0.20	0.25	0.70			1.00	1.81	1.27	0.09
		0.40	0.35	1.10			1.00	5.52	6.07	0.77
	0.40	0.45	1.30			2.00	14.40	18.71	2.59	
	0.45	0.70	1.85			6.00	26.70	49.40	8.41	
	0.20	0.25	0.70			1.00	1.86	1.30	0.09	
	TOTAL ALLEGES PREFA					11.00	50.29	76.76	11.96	
PLANCHERS	PLANCHER TRADI									
				H T	EPAIS.				M² total	M3
				0.25	0.25				11.94	2.98
				0.25	0.25				12.12	3.03
				0.70	0.70				264.02	184.81
		TOTAL PLANCHER TRADI				0.66	← Ep Moyenne		288.08	190.83
	ALVEOLAIRE									
	Type	Portée Moyenne	Largeur	H T	D Compr	Nb			M² total	M3 comp
	0.24	11.50	1.20	0.29	0.08	10.00			134.21	10.74
		TOTAL DALLES ALVEOLAIRES			0.08	10.00			134.21	10.74
PREDALLE										
Ep Predalle	Ep Totale	Portée Moyenne	Largeur	H T	D Compr	Nb		M² total	M3 comp	
0.06	0.25	7.45	1.20	0.20	0.19	61.00		537.00	102.03	
0.06	TOTAL PREDALLES				0.19	61.00		537.00	102.03	
	TOTAL PLANCHERS :							422.29	201.57	
	TOTAL PLANCHERS - TREMIS :							422.29	201.57	

D.4 Exemple pour calcul de temps de grue

PROJECT: KONS - IMMEUBLE BUREAUX ET APPARTEMENTS

TYPE OF CRANE: POTAIN MD 345 LIT **HOISTING SPEED:** 100,00 M/MIN
JIB: 65 M **ROTATION SPEED:** 0,80 ROT/MIN
HOISTING HEIGHT: 36,4 M **HOIST TRAVEL SPEED:** 100,00 M/MIN
MAXIMUM CAPACITY: 12 TON **TRAVEL SPEED:** 0,00 M/MIN
GROUND LEVEL: 0,00 M **LEVEL OF WORKS:** 15,00 M

ANALYSIS FOR: POSE DE PRÉMURS
LEVEL: LEVEL +1

LOADED MOVEMENTS

MOUVEMENTS / DISTANCES			
ITEM	QUANT.	UNITS	TOTAL (MIN.)
HOIST UP	8,00	M	0,08
ROTATION	90,00	°	0,31
HOIST TRAVEL	20,00	M	0,20
CRANE TRAVEL	0,00	M	0,00
HOIST DOWN	0,00	M	0
			0,59

UNLOADED MOVEMENTS

MOUVEMENTS / DISTANCES			
ITEM	QUANT.	UNITS	TOTAL (MIN.)
HOIST UP	0,00	M	0,00
ROTATION	90,00	°	0,31
HOIST TRAVEL	22,00	M	0,22
CRANE TRAVEL	0,00	M	0,00
HOIST DOWN	8,00	M	0,08
			0,61

OPERATION CYCLE

MOUVEMENTS / DISTANCES			
ITEM	QUANT.	UNITS	TOTAL (MIN.)
SLING OPERATION	2,00	MIN.	2,00
INSTALLATION	10,00	MIN.	10,00
UNSLING OPERATION	2,00	MIN.	2,00
OR			
SINGLE OPERATION/UN	0,00		
			14,00

TOTAL OPERATION: 15,21

COMMENTS: Y COMPRIS RÉGLAGE ET STABILISATION

D.5 Code

Le programme Matlab a été utilisé pour modéliser le problème ainsi que l'interface graphique rattachée à ce problème. Dans un souci d'efficacité, le programme a d'abord été réalisé sans interface graphique pour obtenir rapidement des résultats. Ensuite, l'expérience de l'utilisateur a été réfléchi et une nouvelle version du programme avec cette fois-ci une interface a été réalisé. Vu qu'il n'y a aucune utilité à transposer tout le code en annexe, il a été déposé sur le serveur Google Drive disponible sur <https://drive.google.com/drive/folders/0B9BXGVKDZPd-bmdMSkJfbFBycjQ?usp=sharing>. Toutefois, les principales fonctions de l'implémentation logicielle est décrite dans cette annexe. Avant d'optimiser le programme, établit une grille de points sur toute la surface du problème. Ensuite, il essaye de multiples solutions pour les coordonnées des zones de stockage jusqu'à ce qu'elle converge vers un minima local pour l'angle de rotation .

Les fonctions utilisés :

1. `DrawPenalty.m`

script général qui reprend l'ensemble des données, contraintes, fonctions et affiche les résultats sous forme de graphique et de données (θ et les positions des zones de stockage).

2. `GlobalMinGrid(fun,penlist,cout,CNE,CSW,NP)`

La minimisation a été réalisé grâce à la fonction déjà implémentée d'origine dans Matlab

```
fminsearch(fun,UU0)
```

3. `CostRectOut(x,y,CNE,CSW,cmax)`

Représente la contrainte due au bâtiment à construire avec la position du coin Nord Est (*CNE*) et Sud Ouest (*CSW*). C'est une fonction de coût qui regarde que les coordonnées de la zones de stockage x,y sont en dehors du bâtiment. *cmax* est un nombre très élevé qui permet d'éviter que l'optimisation crash du à l'utilisation de *fminsearch* qui donnerait alors des valeurs infinies.

4. `CostRectIn(x,y,CNE,CSW,cmax)`

Représente la contrainte due au terrain où il faut construire avec la position du coin Nord Est (*CNE*) et Sud Ouest (*CSW*). C'est une fonction de coût qui regarde que les coordonnées de la zones de stockage x,y sont à l'intérieur du terrain. *cmax* est un nombre très élevé qui permet d'éviter que l'optimisation crash du à l'utilisation de *fminsearch* qui donnerait alors des valeurs infinies.

5. `CostCircIn(x,y,RAD,cmax)`

Représente la contrainte du au rayon de giration de la grue. Le grue est définie par sa flèche *RAD*. *cmax* est un nombre très élevé qui permet d'éviter que l'optimisation crash du à l'utilisation de *fminsearch* qui donnerait alors des valeurs infinies. x et y les différentes coordonnées des zones de demande et de stock.

6. `CostCircOut(x,y,RAD,cmax)`

Représente la contrainte de non superposition. Même principe que le précédent sauf que *RAD* représente la espace entre les zones de stockage.

Finalement, l'interface graphique a été réalisé avec *Graphical User Interface* créant un fichier

`Algo.m`

`DrawPenaltyGUI.m` modifiée pour tenir compte de l'interaction avec l'utilisateur.

D.6 Résultats détaillés

Résultats détaillés

Zones - (Numéro sur le plan)	Type	Melun optimisé non-contraint			Melun optimisé défavorable			Melun optimisé non-contraint			Melun cas défavorable		
		Melun Réalité	t	contraint	Melun Réalité	Melun optimisé	Melun cas	Melun Réalité	contraint	Melun optimisé	Melun Réalité	Melun cas	Melun cas
\$1A (1)	Voiles	479	4	4	550	1,66	0,01	0,01	1,66	0,01	0,01	1,90	1,90
\$1B (2)	Voiles	880	444	444	3090	4,70	1,55	1,55	4,70	1,55	1,54	12,61	10,70
\$2A (3)	Prémurs	2188	399	399	2844	12,28	2,93	2,93	12,28	2,93	1,38	22,45	9,85
\$2B (4)	Prémurs	3402	1170	1934	3470	24,06	6,98	9,63	11,78	4,05	6,70	34,47	12,02
\$3A (5)	Poteaux	398	184	184	1322	25,44	7,62	10,27	1,38	0,64	0,64	39,05	4,58
\$3B (6)	Poteaux	1529	535	587	1491	30,73	9,47	12,30	5,29	1,85	2,03	44,21	5,16
\$4B (7)	Poteaux circ.	912	56	328	872	33,89	9,66	13,44	3,16	0,19	1,14	47,23	3,02
\$5A (8)	Poutre Préfab	651	221	221	1212	36,15	10,43	14,20	2,25	0,76	0,76	51,43	4,20
\$5B (9)	Poutre préfab	2710	700	1133	2815	45,53	12,85	18,13	9,38	2,42	3,92	61,18	9,75
\$6A (10)	Poutre CSP	22	3	3	227	45,60	12,86	18,14	0,08	0,01	0,01	61,96	0,79
\$6B (11)	Poutre CSP	928	659	890	1402	48,82	15,14	21,22	3,21	2,28	3,08	66,82	4,86
\$7A (12)	Prédalles	6675	1076	1076	8613	71,93	18,87	24,94	23,11	3,72	3,72	96,64	29,83
\$7B (13)	Prédalles	7686	3858	5499	11129	98,55	32,23	43,98	26,62	13,36	19,04	135,18	38,54
\$8A (14)	Escaliers	291	83	824	656	99,56	32,51	46,84	1,01	0,29	2,85	137,46	2,27
\$8B (15)	Escaliers	476	297	296	442	101,21	33,54	47,86	1,65	1,03	1,03	138,99	1,53
		Somme des Angles par zone en degré			temps cumulé en min			temps non cumulé en min					

ID sur le plan	Type	Temps total non optimal [min]	Temps total avec optimisation [min]	Gain sur temps total	Gain sur déplacement	Portion déplacement par rapport au total	Temps mvt grue non optimal [min]	Temps mvt grue avec optimisation [min]	Unités
1	Voiles	12,15	10,51	13,5%	62,2%	22%	2,64	1,00	3
2	Voiles	107,57	106,06	1,4%	22,7%	6%	6,64	5,13	11
3	Prémurs	279,79	273,59	2,2%	44,9%	5%	13,79	7,59	19
4	Prémurs	369,96	364,87	1,4%	25,5%	5%	19,96	14,87	25
5	Poteaux	36,72	35,98	2,0%	17,1%	12%	4,32	3,58	9
6	Poteaux	53,24	49,98	6,1%	39,6%	15%	8,24	4,98	9
7	Poteaux circ.	29,79	27,77	6,8%	42,2%	16%	4,79	2,77	5
8	Poutre Préfab	76,87	75,38	1,9%	30,6%	6%	4,87	3,38	8
9	Poutre préfab	186,60	181,14	2,9%	35,0%	8%	15,60	10,14	19
10	Poutre CSP	18,73	18,66	0,4%	9,2%	4%	0,73	0,66	2
11	Poutre CSP	124,46	124,33	0,1%	1,8%	6%	7,46	7,33	13
12	Prédalles	482,26	462,87	4,0%	45,0%	9%	43,06	23,67	61
13	Prédalles	658,88	651,31	1,1%	14,0%	8%	54,08	46,51	84
14	Escaliers	62,32	64,16	-3,0%	-79,6%	4%	2,32	4,16	4
15	Escaliers	62,96	62,33	1,0%	21,1%	5%	2,96	2,33	4
TOTAL		2562,29	2508,95	2,1%	27,9%	7%	191,46	138,11	276

TABLE 12 – Les zones de stockage à localiser

ID	Matériaux	Largeur Moyenne [m]	Longueur Moyenne [m]	Surface totale [m²]
S_{1A}	Voiles Extérieurs	3,08	5,7	53,2
S_{1B}	Voiles Extérieurs	4,1	9,2	752,29
S_{2A}	Voiles Courbes	3,32	0,85	47,93
S_{3A}	Acrotères	0,96	13,26	12,73
S_{4A}	Prémurs	3,16	5,7	340,43
S_{4B}	Prémurs	4,29	4,84	497,98
S_{5A}	Poteaux Rectangulaires	2,6	0,4	3,945
S_{5B}	Poteaux Rectangulaires	3,24	0,4	8,053
S_{6B}	Poteaux Circulaires	3,22	4,35	4,111
S_{7A}	Poutres précontraintes	0,3	6,04	44,55
S_{7B}	Poutres précontraintes	0,4	6,65	145,37
S_{8A}	Poutres préfabriquées	0,2	4,57	75,45
S_{8B}	Poutres préfabriquées	0,4	5,5	34,86
S_{9B}	Poutres traditionnelles	0,24	8,3	91,68
S_{10A}	Prédalles	1,2	7,45	537
S_{10B}	Prédalles	2,4	18,98	1594,48

E Temps unitaires de ferrailage

ACTIVITE DE FERRAILLAGE**Calcul des temps unitaires***Amélioration continue des performances sur
chantier par optimisation des zones de stockage
et d'approvisionnement*

Date: 30/05/17

rev: 01

Auteur: AdH

Description (élément, matériel, ...)	Ouvrier [u]	Temps [min]	AVA	Remarque
Ferrailage poutre	2	00:58:40		
A/R 2 barres	1	01:50		Dépend de la zone de stockage
A/R 2 barres	1	01:50		//
A/R barres pliées	1	02:30	X	//
Recherche barre	1	02:30		
Recherche barre pliée	1	03:10		Toutes empilées
Erreur d'élément	1	04:20		Favorisé en cas de surstock
Ligaturage	2	42:30	X	
Ferrailage voile	2	01:03:05		
Sortie treillis soudé	2	07:15		Monter sur le tas
A/R U	1	01:30		
Recherche des U	1	03:10		Toutes empilées
Coupe des bords	2	07:30	X	
Pose des U	2	17:00	X	
Ligaturage	2	22:00	X	
Erreur d'élément	1	04:40		Favorisé en cas de surstock

