

Etude de faisabilité de l'intégration des constructions « drone compatible » dans les modèles BIM

Mémoire présenté par
Anne-Sophie BRANDERS & Antoine BRUNEAU

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

Promoteur
Pierre LATTEUR
Lecteurs

**Maude ARCHAMBEAU, Jean-Pierre COUWENBERGH,
Sébastien GOESSENS, Thomas VANDENBERGH**

Année académique 2016-2017

Remerciements

Nous voudrions remercier l'ensemble des personnes qui nous ont aidé pour mener à bien ce travail :

- Prof. P. Latteur et Mr S. Goessens, Ecole Polytechnique de Louvain (EPL), Université Catholique de Louvain (UCL), pour leurs conseils et leur supervision dans ces recherches ;
- Prof. A. Pugnale, University of Melbourne, pour le temps consacré à notre travail, les conseils avisés et les nombreuses idées ;
- T. de Furstenberg, J.-F. Leboutte, C. Manderlier et V. Parisel, Ecole Polytechnique de Louvain (EPL), Université catholique de Louvain (UCL), pour le partage d'idées à propos de la construction par les drones, sujet commun à nos mémoires ;
- Mme A.-L. Cadji, Université Catholique de Louvain (UCL), et Mme S. Roberts, University of Melbourne, pour l'organisation de notre échange à l'université de Melbourne ;
- La chaire d'innovation Lhoist Berghmans, pour le financement de notre voyage à l'université de Melbourne ;
- Mr G. Beague (B2Ai), Mr R. Collard (BAM Contractor), Mr D. Froyen (Kumpen S.A.), Mr B. Marynissen (SECO) et Mr T. Vandenberg (Besix), pour leur accueil et le temps qu'ils ont consacré pour nous expliquer le développement du BIM au sein de leur société ;
- S. Lemaître et S. Pecceu pour leur aide apportée tout au long du travail ;
- Prof. J.-P. Couwenbergh, Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI), Université Catholique de Louvain (UCL), pour son accueil à la formation continue sur le BIM ;
- Les membres du Forum en ligne *Dynamobim*, pour le temps consacré à nos différentes questions relatives au logiciel *Dynamo*.

Liste des figures

FIGURE 1 – INDUSTRIALISATION DE LA PRODUCTION AU JAPON DANS LES ANNEES 60 [1]	5
FIGURE 2 – LES MODELES SMART CONSTRUCTION DEVELOPPES PAR KOMATSU [2]	6
FIGURE 3 – ROBOT SKANSKA PERFORATEUR	7
FIGURE 4 – HADRIAN (A GAUCHE) ET SAM (A DROITE)	8
FIGURE 5 – PIKE LOOP EN CONSTRUCTION EN 2009 A NEW-YORK (CE ROBOT N’EST PAS SAM) [10]	9
FIGURE 6 – IMPRIMANTE 3D EN USINE (A GAUCHE) [11] ET ROBOT IMPRESSION 3D MOBILE (A DROITE) [12]	10
FIGURE 7 – SUJETS DE RECHERCHE AVEC LES DRONES. [15] [16] [17]	13
FIGURE 8 – A GAUCHE – « THE FLIGHT ASSEMBLED ARCHITECTURE INSTALLATION » DE 6M DE HAUT CONSTRUITE AVEC 1500 ELEMENTS ET 4 QUADROPTERES. [21]	13
FIGURE 9 – A DROITE – DEUX QUADROPTERES CONSTRUISANT LA MAQUETTE AVEC DES MODULES DE 30 CM DE LONG. [21]	13
FIGURE 10 – UN DRONE CONSTRUISANT UNE STRUCTURE AVEC UN FIL	14
FIGURE 11 – CONSTRUCTION PAR DES DRONES D’UNE STRUCTURE FILAIRE AVEC UN NOUVEAU DEGRE DE LIBERTE	14
FIGURE 12 – PHOTOS INTERMEDIAIRE D’UNE PYRAMIDE CONSTRUITE PAR 3 QUADROPTERES.	15
FIGURE 13 – TEMPS PASSE PAR LES DRONES DANS LES DIFFERENTS ETATS PENDANT LA CONSTRUCTION	15
FIGURE 14 – DRONE DEVELOPPE PAR L’UCL	17
FIGURE 15 – ESSAI EN LABORATOIRE DU DRONE AVEC DES CONES EN BETON	17
FIGURE 16 – SYSTEME DE PREHENSION (A) PAR PINCE (B) PAR AIMANT	18
FIGURE 17 – DROXELS : TYPE DE DRICKS CONÇU PAR L’UCL	18
FIGURE 18 – DRICKS LIGHT PLUS DEVELOPPES EN 2016-2017	19
FIGURE 19 – VISUALISATION D’UN PROJET SUR LE PROGRAMME DRONICKS	19
FIGURE 20 – DIVISIONS POSSIBLES D’UN MUR	21
FIGURE 21 – POSSIBILITES POUR PASSER LES MEP A TRAVERS UN MUR	22
FIGURE 22 – SUPERPOSITION DES MAQUETTES DE CHAQUE INTERVENANT [9]	23
FIGURE 23 – TIMELINE DES RECHERCHES AU SEIN DU POLE GC A L’EPL	29
FIGURE 24 – PLAN D’AVANCEMENT DE LA CONSTRUCTION DE LA DRON’HOUSE	30
FIGURE 25 – DESCRIPTION DE LA ZONE DE VOL	33
FIGURE 26 – TECHNIQUE D’ASSEMBLAGE POSSIBLE	33
FIGURE 27 – CONTRIBUTION ET UTILISATION DU MODELE BIM PENDANT LA CONCEPTION	42
FIGURE 28 – UTILISATION ET MISE A JOUR DU MODELE BIM PENDANT LA CONSTRUCTION	43
FIGURE 29 – PROCESSUS DE CONSTRUCTION "DRONE COMPATIBLE" [43]	55
FIGURE 30 – LOGO OF DYNA’DRONE	57
FIGURE 31 – DYNA’DRONE	57
FIGURE 32 – HOW TO DOWNLOAD DYNAMO FOR REVIT	58
FIGURE 33 – OPENING DYNAMO FROM REVIT	58
FIGURE 34 – ADD PACKAGES ON DYNAMO	59
FIGURE 35 – STRUCTURE OF DYNA’DRONE	60
FIGURE 36 – INPUT FOR THE EXCEL DESTINATION FILE	61
FIGURE 37 – EXAMPLES OF RESULT FOR THE SLICING FUNCTION	62
FIGURE 38 – "SLICE" NODE	63
FIGURE 39 – INPUTS FOR THE SLICING	63
FIGURE 40 – EXAMPLE OF PLACEMENT OF A FLOOR SYSTEM WITH DIFFERENT SPAN DIRECTIONS	65
FIGURE 41 – EXAMPLE FOR THE PLACEMENT OF A FLOOR SYSTEM, WITH DIFFERENT SIZES OF « CLAVEAUX »	65
FIGURE 42 – "PLACE POUTRAINS" NODE	66
FIGURE 43 – INPUTS FOR THE PLACEMENT OF A FLOOR SYSTEM	66
FIGURE 44 – “ADD CONSTRAINT ON WALL’S LENGTH AND HEIGHT” FUNCTIONALITIES	68
FIGURE 45 – DIVIDING FACTORS	68
FIGURE 46 – EXAMPLE OF ERROR MESSAGE	68
FIGURE 47 – "ADD CONSTRAINT ON OPENINGS’ SIZE AND POSITION" FUNCTIONALITY	69
FIGURE 48 – CHECK ELEMENTS’ WEIGHT	69

FIGURE 49 – POSITION DU NOEUD "SLICING" DANS LA STRUCTURE DU PROGRAMME	70
FIGURE 50 – EXEMPLE D'UN MUR SIMPLE DESSINE DANS REVIT ET SA DESCRIPTION PAR SA COURBE DE BASE ET SA HAUTEUR	71
FIGURE 51 – EXEMPLE DU SLICING D'UN MUR SIMPLE.....	72
FIGURE 52 – ILLUSTRATION DE L'ALGORITHME DE CREATION DE SEQUENCES DE MURS ADJACENTS	73
FIGURE 53 – POSITION DU NŒUD "SORTÉLEMENTS" DANS LA STRUCTURE DU PROGRAMME	74
FIGURE 54 – SLICING D'UNE SEQUENCE DE MURS ADJACENTS.....	75
FIGURE 55 – CAS DE MUR ADJACENT OU LA PREMIERE BRIQUE DOIT ETRE PLACEE AU DEBUT DU MUR.....	75
FIGURE 56 – CAS DE MUR ADJACENT OU LA PREMIERE BRIQUE DOIT ETRE DECALEE VERS L'AUTRE EXTREMITE DU MUR.....	75
FIGURE 57 – SLICING DE MURS ADJACENTS.....	76
FIGURE 58 – EXEMPLE DE MURS MULTIPLES AVEC OUVERTURES	77
FIGURE 59 – EXEMPLE DE SLICING AVEC UNE OUVERTURE	78
FIGURE 60 – EXEMPLE DE SLICING AVEC UNE OUVERTURE ET UN LINTEAU	79
FIGURE 61 – POSITION DU NŒUD "PLACE POUTRAINS" DANS LA STRUCTURE DU PROGRAMME	80
FIGURE 62 – EMBLACEMENT DES FUTURS POUTRAINS DANS LE CAS DU CHOIX DU PLUS PETIT SENS DE PORTEE.....	81
FIGURE 63 – EMBLACEMENT DES FUTURS POUTRAINS DANS LE CAS DU CHOIX DU PLUS GRAND SENS DE PORTEE	81
FIGURE 64 – TRANSFORMATION D'UN SOL EN POUTRAINS GRACE A DYNA'DRONE	82
FIGURE 65 – POSITION DU NŒUD "PLACE CLAVEAUX" DANS LA STRUCTURE DU PROGRAMME	82
FIGURE 66 – CREATION DES DROITES POUR LA POSITION DES FUTURS CLAVEAUX	83
FIGURE 67 – RESULTAT D'EXECUTION DE DYNA'DRONE POUR LE PLACEMENT DE CLAVEAUX	83
FIGURE 68 - TYPES DE BLOCS	84
FIGURE 69 - EXEMPLE DE CONSTRUCTION AVEC DES DRICKS LIGHT PLUS	84
FIGURE 70 - ARGUMENTS D'ENTREE DU NOEUD DE SLICING ADAPTE POUR LES DRICKS LIGHT PLUS	85
FIGURE 71 - EXEMPLE D'UTILISATION DE DYNA'DRONE POUR UNE SEQUENCE DE DEUX MURS	86
FIGURE 72 - EXEMPLE DE MURS CONSTITUES DE DRICKS LIGHT PLUS, CREEES AVEC DYNA'DRONE	86
FIGURE 73 – EXEMPLE D'EXECUTION DE DYNA'DRONE POUR UNE MAISON 2 ETAGES	88
FIGURE 74 – EXEMPLE D'EXECUTION DE DYNA'DRONE POUR UNE MAISON AVEC UN MUR ARRONDI ET UN PORTE A FAUX.....	88
FIGURE 75 – EXEMPLE D'UN MEME MUR DIVISE AVEC DES BLOCS DIFFERENTS.....	89
FIGURE 76 – LES PARAMETRES DE LA CONSTRUCTION EN FONCTION DE L'AVANCEMENT DU PROJET	98
FIGURE 77 – VERIFICATION D'UNE STRUCTURE METALLIQUE EN SUPERPOSANT LA MAQUETTES DE L'ARCHITECTE (GRISE) ET CELLE DE L'ENTREPRISE DE METALLURGIE (ROUGE)	99
FIGURE 78 – LES NIVEAUX DE BIM	100
FIGURE 79 – LEVEL OF DEVELOPMENT D'UNE CHAISE.....	101
FIGURE 80 – LES ECHANGES AVEC LE BIM.....	102
FIGURE 81 – LES ECHANGES SANS LE BIM.....	102

Liste des tableaux

TABLEAU 1 – AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES ROBOTS SUR CHANTIER	11
TABLEAU 2 – REVISION DU PROTOCOLE	36
TABLEAU 3 – COORDONNEES DES MEMBRES DU PROJET.....	37
TABLEAU 4 – MISSIONS POUR LE DEVELOPPEMENT DU DRONE.....	39
TABLEAU 5 – MISSIONS POUR LA CONSTRUCTION DE LA DRON'HOUSE	40
TABLEAU 6 – RECAPITULATIF DES INFORMATIONS NECESSAIRES DANS LE MODELE BIM	41
TABLEAU 7 – MISSIONS A REALISER PAR LE RESPONSABLE PROJET & BIM	47
TABLEAU 8 – MISSIONS A REALISER PAR L'ARCHITECTE.....	48
TABLEAU 9 – MISSIONS A REALISER PAR LES ETUDIANTS INGENIEURS EN CONSTRUCTION.....	49
TABLEAU 10 – MISSIONS A REALISER PAR LE SPECIALISTE DRONE.....	50
TABLEAU 11 – MISSIONS A REALISER PAR LE FOURNISSEUR	51
TABLEAU 12 – SIGNATURE DES PARTICIPANTS	52

Table des matières

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	iii
Table des matières	iv
1 Introduction	2
1.1 Contexte général.....	2
1.1.1 La construction par drones	2
1.1.2 Le BIM : Building Information Modeling	2
1.1.3 Drones + BIM = ?	2
1.2 Objectifs du mémoire.....	3
1.3 Recherches complémentaires réalisées à l'EPL pendant l'année 2016-2017.....	3
2 La robotisation de la construction	5
2.1 L'industrialisation de la construction.....	5
2.1.1 L'industrialisation dans les années 60.....	5
2.1.2 La robotisation actuelle	5
2.1.3 Quel futur pour la robotisation ?	11
2.2 Les drones	13
2.2.1 Recherches à travers le monde.....	13
2.2.2 Les recherches à l'EPL [25] [26] [27].....	17
2.2.3 La construction par les drones de demain	20
2.3 Le BIM, l'ouverture de la construction aux robots	21
2.3.1 Définition des standards.....	21
2.3.2 Une utilisation efficace des modèles 3D	22
2.3.3 En attendant la robotisation totale.....	24
2.4 Quel futur pour la robotisation ?	25
2.4.1 Les limites actuelles de la robotisation.....	25
2.4.2 L'innovation pour la robotisation.....	26
2.4.3 Recherches à l'UCL avec les drones.....	26
3 Des projets pour innover	28
3.1 Introduction.....	28
3.2 La Dron'house.....	30
3.2.1 Le challenge	30
3.2.2 Les objectifs	31
3.2.3 Organisation	31
3.2.4 Le planning général.....	32

3.2.5	Paramètres et limitations	32
3.3	Le protocole BIM/Plan d'exécution	35
3.3.1	Avant-propos	35
3.3.1	Informations générales	36
3.3.2	Acteurs du projet et missions	36
3.3.3	Missions du projet et détermination du niveau de BIM requis	38
3.3.4	Structuration de la maquette	44
3.3.5	Procédures de collaboration	45
3.3.6	Missions détaillées de chaque partenaire	46
3.3.7	Conclusion	52
3.4	Révolution de la construction	53
4	Outil de traduction d'un modèle Revit en éléments « drone compatible »	55
4.1	Introduction	55
4.2	User Guide	57
4.2.1	What is Dyna'drone for Revit ?	57
4.2.2	Installation of Dynamo and the packages	58
4.2.3	Structure of the program	59
4.2.4	Excel destination file	61
4.2.5	Slicing of walls	61
4.2.6	Placement of a floor system	64
4.2.7	Additional features	68
4.3	Routines créées pour Dyna'drone	70
4.3.1	Slicing des murs	70
4.3.2	Placement d'un étage	79
4.4	Création de maisons en Dricks-LP-60 grâce à Dyna'drone	83
4.4.1	Introduction	83
4.4.2	Exécution de Dyna'drone avec les Dricks Light Plus	85
4.5	Dans le futur	87
4.5.1	Evolution de Dyna'drone	87
4.5.2	Conclusion	87
5	Conclusion	91
6	Bibliographie	93
7	Annexe	97
7.1	Qu'est-ce que le BIM ?	97
7.1.1	Définition	97
7.1.2	Les principes	97
7.1.3	Les niveaux de BIM	99

7.1.4	Level of development (LOD).....	100
7.1.5	Conclusion.....	102

Chapitre 1

Introduction

SOMMAIRE

1.1 Contexte général

1.2 Objectifs du mémoire

1.3 Recherches complémentaires réalisées à l'EPL pendant l'année
2016-2017



1 Introduction

1.1 Contexte général

1.1.1 La construction par drones

Voir passer des drones qui filment, qui portent des colis ou simplement qui volent, cela devient monnaie courante dans le monde d'aujourd'hui. Mais construire des bâtiments avec des drones, est ce quelque chose d'utopique ? Cela fait maintenant 3 ans que des membres de l'EPL¹ essayent de démontrer le contraire. Ce mémoire s'insère donc dans les recherches lancées par le Prof P. Latteur à propos de la construction par les drones.

Construire avec des drones implique de revoir les éléments de construction afin de répondre à deux contraintes majeures : la limitation du poids qu'ils sont capables de transporter et l'imprécision de leur positionnement dans l'espace. Le processus de construction doit également être revu car un drone n'est rien d'autre qu'un robot et nécessite donc d'être automatisé.

Entre 2014 et 2016, les recherches ont portées sur 3 aspects principaux :

- Le développement d'éléments de construction adaptés pour le transport et le placement par un drone, ainsi que leur système de préhension
- Le développement du drone lui-même, de son système de positionnement et de ses aspects techniques
- La conception d'une application permettant d'assembler une structure de base avec des éléments simples et le développement d'algorithmes de contrôle pour le processus de construction

1.1.2 Le BIM : Building Information Modeling

Le BIM est une méthodologie de travail axée autour de la collaboration entre les différents acteurs d'un projet. Celle-ci fonctionne grâce au partage des informations, majoritairement encodées sur un modèle 3D appelé « modèle BIM ». L'objectif est d'améliorer le monde de la construction en développant des processus plus efficaces, en préparant d'avantage les chantiers en amont afin d'y réduire les erreurs de confection et en assurant un meilleur suivi du cycle de vie du bâtiment. Les constructions sont donc amenées à être de meilleure qualité, moins chères et plus efficaces. Cette méthode de travail, largement présente aux Etats-Unis, en Angleterre ou au Pays Bas est en plein développement en Belgique, où certaines grandes sociétés l'utilisent déjà activement. Pour les moins initiés, l'annexe 7.1 « Qu'est-ce que le BIM ? » explique plus précisément ce qu'est le BIM, quel est son intérêt et comment il est mis en place sur un projet.

1.1.3 Drones + BIM = ?

Si le futur des drones pour la construction² est encore en pleine réflexion, le BIM commence à prendre de l'importance, quitte à sembler indispensable pour certains gros projets. Le sujet de notre mémoire « *Etude de faisabilité de l'intégration des constructions « drone compatible » au sein des modèles BIM* » permet d'analyser le lien entre ces deux révolutions et de se poser la question de savoir s'ils ont un avenir commun possible. C'est sur cette question que nous avons posé les objectifs présentés ci-dessous.

¹ EPL : Ecole Polytechnique de Louvain

² Les drones sont de plus en plus utilisés dans la construction pour l'analyse de terrains ou les relevés photographiques de projets. En évoquant "le futur des drones pour la construction", nous ne ciblons que la construction de bâtiments par le biais de drones

1.2 Objectifs du mémoire

La finalité de ce mémoire est d'étudier la faisabilité de l'intégration des constructions « drone compatible » au sein des modèles BIM. Cela est développé selon 3 objectifs principaux :

La robotisation de la construction :

Les clients (maître d'ouvrage) sont de plus en plus exigeant quant à la qualité et au temps de développement et de construction des ouvrages. Afin de répondre à cette problématique, les acteurs de la construction essaient d'industrialiser la construction des ouvrages par l'ajout de robot sur les chantiers. Cette première partie amène une réflexion sur le développement de ces robots et le développement du BIM au sein des nouveaux projets. Une cohabitation des deux est-il possible ?

Des projets pour innover :

Pour aller plus loin dans ce sujet, des pistes de recherches au sein même de l'EPL sont proposées autour des drones et de la robotisation sur les chantiers. Un plan d'exécution BIM est mis en place pour concrétiser les recherches à l'EPL sur les drones et découvrir leurs possibilités dans la construction moderne.

Outil de traduction d'un modèle Revit en éléments « drone compatible » :

Cette partie a pour objectif de développer un outil simple, complet et adaptable afin de convertir des modèles BIM créés sur le logiciel Revit en éléments compatibles avec la construction par drone. Ce programme est destiné à être utilisé dans le cadre des recherches mentionnées au point précédent.

1.3 Recherches complémentaires réalisées à l'EPL pendant l'année 2016-2017

En parallèle à notre thèse, deux autres mémoires ont été développés dans le cadre de la recherche sur la construction par les drones.

Le premier, réalisé par Charline Manderlier et Tassilo de Furstenberg, est une « *Etude de faisabilité de structures en bois "drone-compatible"* ».

Le second, réalisé par Jean-François Leboutte et Vincent Parisel, concerne le « *Développement d'un système "drone compatible" pour la construction de maisons unifamiliales en béton et maçonnerie* »

Même si nos recherches n'avaient pas les mêmes objectifs, la collaboration avec les deux autres groupes fut très enrichissante de par la diversification des points de vue sur la construction par drones en général ou par la complémentarité de certains aspects de recherche. A plusieurs reprises dans ce mémoire, des références vers leur travail sont mentionnées.

Chapitre 2

La robotisation de la construction

SOMMAIRE

- 2.1 L'industrialisation de la construction
- 2.2 Les drones
- 2.3 Le BIM, l'ouverture de la construction aux robots
- 2.4 Quel futur pour la robotisation ?



2 La robotisation de la construction

La construction est un secteur à part dans le monde industriel, ce qui engendre un développement des robots différent. Ce chapitre invite à la réflexion quant à la présence des robots dans le monde de la construction.

La première partie évoque le développement de plusieurs robots inventés par des industries de la construction. Ces études permettent de mieux cerner le rôle des robots, de connaître leurs avantages et leurs limites. La seconde partie est dédiée spécifiquement aux recherches sur les drones, effectuées dans le monde et à l'UCL, afin de comprendre leurs différences par rapport aux autres robots déjà développés. L'emploi de robots suggère l'utilisation d'une description numérique du bâtiment afin de les contrôler. La méthode BIM, instaurée dans la construction classique répond-elle aux besoins de ces robots ? Cette question est mise en avant dans la troisième partie. La dernière partie sert à tirer des conclusions quant à la robotisation de la construction.

2.1 L'industrialisation de la construction

2.1.1 L'industrialisation dans les années 60

Si, par exemple, la fabrication de briques est industrialisée depuis le début du XIX^{ème} siècle et que l'ensemble des matériaux de construction le sont aujourd'hui, la construction finale d'un ouvrage est encore une succession de tâches uniques réalisées par des ouvriers spécialisés.

L'apparition des robots dans les années 60 a provoqué une tentative d'industrialisation de la construction. Cependant, la production en masse réalisée dans les autres milieux industriels est difficile à mettre en place dans la construction car elle nécessite une standardisation des tâches sur chantier et des ouvrages. Cette standardisation est l'exacte opposée de la construction puisque chaque ouvrage est une « œuvre d'art » unique conçue par un architecte. De nos jours, seule la fabrication des éléments de construction est entièrement industrialisée et automatisée.

A la même époque, les japonais ont développé la préfabrication. Afin d'industrialiser la construction, ils ont créé des chaînes de montage pour produire des parties de maisons. Si les robots ne sont pas présents à cause de la spécificité des tâches, la production à la chaîne permet d'augmenter le rendement des ouvriers. Des personnalisations restaient possibles en sortant temporairement l'élément de la chaîne de la production dans des zones spécifiques. Si la préfabrication est aujourd'hui très présente, elle reste principalement utilisée pour le gros œuvre d'ouvrages importants et pour des constructions en bois légères. [1]



Figure 1 – Industrialisation de la production au Japon dans les années 60 [1]

2.1.2 La robotisation actuelle

Depuis l'apparition des premiers automates dans les années 50, la capacité des ordinateurs et des robots a évolué de manière exponentielle. Cette évolution permet aujourd'hui de remettre en question des principes ancestraux de la construction tels que la « grue », inventée 500 ans avant Jésus-Christ. Aujourd'hui, de nombreuses universités et centres de recherche d'entreprises de la construction pensent que la robotisation va permettre l'industrialisation sur chantier et développent donc des robots pour la construction. Certains robots ont déjà vu le jour et sont actuellement utilisés ou en train d'être testés.

Afin de comprendre l'avantage de ces robots mais aussi leurs besoins et leurs difficultés, plusieurs d'entre eux sont analysés dans ce travail.

2.1.2.1 Robot KOMATSU « SMARTCONSTRUCTION » [2] [3]

KOMATSU est une entreprise japonaise qui fabrique des engins de construction depuis 1917. Elle développe des bulldozers et des excavatrices intelligentes depuis 2013 dans le but d'assister l'opérateur dans la réalisation de son terrassement.

L'engin de chantier est directement connecté au modèle BIM du projet qui est lui-même en relation avec un drone qui s'occupe de scanner le terrain en temps réel. Le modèle BIM compare les données topographiques réelles et celles désirées, et transfère les informations à l'engin de chantier. Son ordinateur intégré assiste l'opérateur pour contrôler la lame ou le godet afin d'effectuer la manœuvre avec le bon angle ou la bonne profondeur.



D61PXi-23 intelligent Machine Control bulldozer launched in June, 2013



PC210LCi-10 intelligent Machine Control hydraulic excavator (overseas specs) launched in October, 2014

Figure 2 – Les modèles SMART CONSTRUCTION développés par KOMATSU [2]

En bref³

- L'engin de chantier nécessite un opérateur
- Utilisation d'un modèle BIM et d'un drone connectés
- Aide à l'opérateur pour un gain en précision et en efficacité
- Météo conciliante nécessaire pour le drone

En conclusion

La technologie intégrée permet d'aider l'opérateur pour réaliser son travail de manière plus précise et plus efficace. Celui-ci garde entièrement le contrôle de l'engin de chantier, ce qui lui permet d'agir après avoir contrôlé la sécurité de sa zone de travail et analysé les données envoyées par l'automate. Cette technologie nécessite l'utilisation d'un modèle BIM et d'un drone connectés mais n'implique aucune modification dans le procédé de construction en lui-même.

³ Vidéo disponible : http://www.komatsu.com/CompanyInfo/ir/annual/html/2015/strategies/smart_construction/

2.1.2.2 SKANSKA Robot [4] [5]

L'entreprise suédoise SKANSKA est à la pointe de la technologie dans le domaine de la construction et notamment dans l'utilisation du BIM. Afin de continuer à se développer dans les technologies de pointes, la firme développe des robots pour travailler sur chantier ainsi que des mini-usines de production transportables pour les secteurs de l'électricité, la plomberie, la mécanique et du bois. La machine décrite ici est une foreuse robotisée placée sur un élévateur mobile automatique.

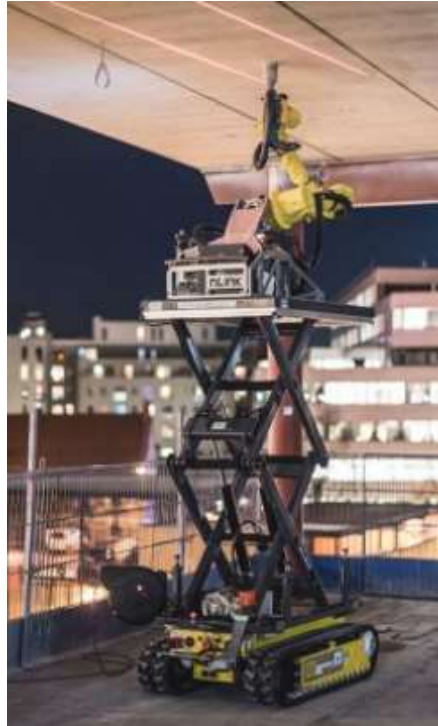


Figure 3 – Robot SKANSKA perforateur

En bref

- Le robot nécessite un sol adapté permettant un déplacement aisé sur le chantier
- Le robot est mono-tâche : forage de trous
- Il réalise les trous 2,5 fois plus rapidement qu'une équipe de 2 ouvriers
- Il se connecte à un modèle BIM pour connaître l'emplacement exact des trous

En conclusion

Le robot développé par SKANSKA est présent sur le chantier pour libérer les ouvriers d'une tâche fatigante et répétitive. Sa vitesse d'exécution est un avantage non négligeable sur un chantier mais sa mobilité est trop limitée à cause des nombreux obstacles présents (changement de niveaux, marche, stockage de matériaux ou d'outils, etc.). Cette contrainte, additionnée à sa mission isolée l'empêche actuellement d'avoir un rôle plus important.

2.1.2.3 Bras robotisés SAM et HADRIAN [6] [7] [8] [9]

Dans le but d'automatiser la fabrication de maisons, des bras robotisés ont été développés. Leur travail consiste à monter des murs avec des briques qu'ils cimentent automatiquement. Deux exemples sont repris ici pour les expliquer : Hadrian the Bricklayer de FastBrick et SAM (Semi – Automated Mason) de Construction Robotics.



Figure 4 – Hadrian (à gauche) et SAM (à droite)

En bref⁴

Hadrian

- Le robot est une excavatrice transformée
- Le robot pose des briques précisément en suivant un modèle 3D.
- Le robot sait découper les briques à la dimension exigée par le modèle.
- Utilisation d'un nouveau liant (remplaçant le ciment) entre les briques pour les maintenir ensemble.
- Il remplace l'humain sur tout le projet sauf pour la pause de linteaux.
- Capacité de pose de 1000 briques par heure.

SAM

- Le robot est posé sur une installation importante devant être installée préalablement.
- Le robot travaille avec un humain. Il cimente et pose les briques des murs plats alors que l'humain réalise les coins de murs et nettoie le ciment qui dépasse.
- Le robot adapte automatiquement l'épaisseur des joints en fonction des modifications dues aux imprécisions des autres éléments sur le chantier.
- Il pose entre 800 et 1200 briques à la journée.
- Il utilise un algorithme pour placer les briques.

⁴ Vidéos disponibles :

<http://www.industrytap.com/brick-laying-robot-lays-1000-bricks-hour-builds-150-homes-year/30233>

<https://www.digitaltrends.com/cool-tech/fastbrick-robotics-bricklayer-robot-hadrian-x/>

- La précision de pose est très bonne, ce qui lui permet d'orienter la brique comme il le désire comme cela a été fait par un robot similaire lors du projet « Pike Loop » à New York, par l'école d'architecture et de fabrication digitale ETH de Zurich en 2009 (présenté sur la Figure 5). [10]



*Figure 5 – Pike Loop en construction en 2009 à New-York
(Ce robot n'est pas SAM) [10]*

En conclusion

Ces robots augmentent grandement la vitesse de pose des briques, comparé à des ouvriers (300 – 500 par jour) et permettent à l'architecte de développer des « nouveaux » designs grâce à leur précision. Malgré la dimension « gigantesque » de Hadrian, ces robots sont très vite limités une fois que la hauteur de l'ouvrage augmente.

2.1.2.4 Imprimante 3D [11] [12] [13] [14]

Depuis que les imprimantes 3D sont apparues, elles sont de plus en plus utilisées dans de nombreux domaines, dont la construction.

La photo de gauche de la Figure 6 montre la construction d'une maison à Shangaï dans un entrepôt. L'imprimante construit la maison en coulant des fines couches de béton qui sont collées entre elles afin d'éviter toute déformation ou effondrement. L'imprimante serait en mesure d'imprimer 10 petites maisons par jour pour un prix unitaire de 3500€.

Le schéma à droite explique la réalisation d'un pont en acier aux Pays-Bas où le robot se fixe directement sur l'ouvrage qu'il imprime en 3D et progresse au fur et à mesure de l'avancement. La start up MX3D développe ce projet qui devrait être construit en 2017 dans un entrepôt à Amsterdam.

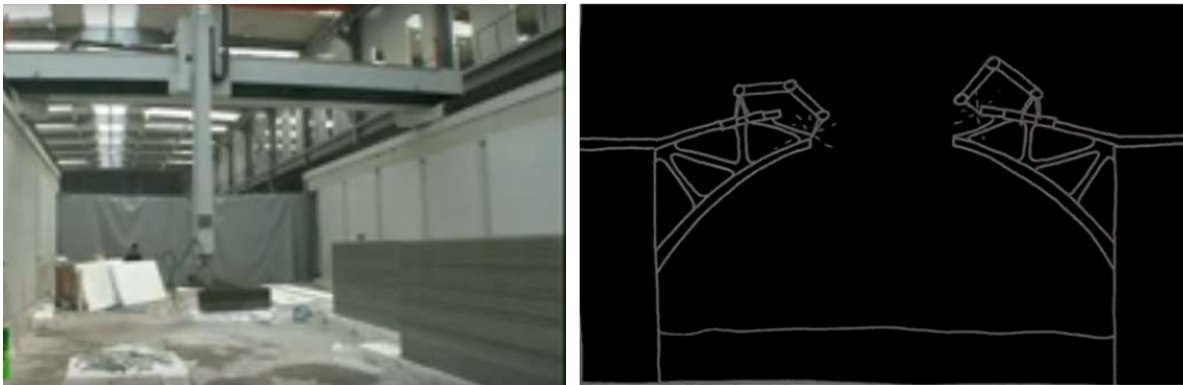


Figure 6 – Imprimante 3D en usine (à gauche) [11] et Robot impression 3D mobile (à droite) [12]

En bref⁵

- Développement de nouveaux designs possible pour l'architecte.
- Utilisation d'un modèle 3D.
- Exécution très rapide comparée à une construction « classique » avec des briques.
- Qualité du rendu extérieur final pas belle pour le moment.
- Utilisation restreinte de matériaux.
- Installation importante.
- Aucun ouvrier n'est nécessaire.

En conclusion

La construction par des imprimantes 3D fait son chemin, mais certaines limites sont rédhibitoires, telles que la taille des installations nécessaires et l'unicité du matériau utilisé. Les nouveautés architecturales possibles et la vitesse de travail de l'imprimante 3D lui permettent de ne pas être abandonnée mais a probablement vocation à être développée exclusivement en usine pour de la préfabrication.

Le développement du bras robotisé capable de se déplacer sur la structure qu'il construit pourrait permettre la création de nombreux ouvrages d'un nouveau genre.

⁵ Vidéo disponible : <https://www.tuxboard.com/impression-3d-construction-maisons-shanghai/>

2.1.3 Quel futur pour la robotisation ?

En essayant d’ajouter des robots sur les chantiers, les entreprises et les centres de recherche essayent d’industrialiser au maximum l’étape critique du monde de la construction. Pour rappel, l’industrialisation à plusieurs objectifs :

- Diminuer les coûts de fabrication.
- Augmenter la rentabilité des machines et des employés.
- Augmenter la vitesse de production.
- Assurer une qualité minimum des produits.
- Augmenter la sécurité pour atteindre le risque 0.

Les projets de robotisation sur chantier présentés dans ce travail ne sont que quelques exemples parmi tant d’autres mais sont représentatif d’un grand nombre d’entre eux. Les avantages et inconvénients des nouveaux robots sur chantier sont reprises dans le Tableau 1.

Projets	Avantages	Inconvénients
Robot KOMATSU	Aide à l'opérateur	Besoin d'un opérateur
	Précision augmentée	Conditions climatiques entrent en jeu
	Réalisation plus rapide	
Robot SKANSKA	Vitesse d'exécution	Capacité de déplacement sur chantier
	Précision importante	
HADRIAN & SAM	Rapidité d'exécution	Limité par son champ d'action
	Précision élevée	Nécessite des installations importantes (SAM)
	Déploiement rapide sur un chantier (HADRIAN)	Robot de dimension importante (HADRIAN)
Imprimante 3D	Construction rapide	Limitation dans les matériaux utilisés
	Nouveau Design possible	Rendu de mauvaise qualité
		Installation très importante et non mobile

Tableau 1 – Avantages et inconvénients des robots sur chantier

À partir de ce tableau, il est possible de tirer quelques conclusions de l’apport des robots sur chantier par rapport aux attentes de l’industrialisation :

- La majorité des robots est autonome et peut donc travailler 24h/24 et 7j/7.
- Les robots conçus répondent à la précision exigée dans la construction, qui est de l’ordre du centimètre voire même plus précis.
- Certains robots ont l’avantage d’être multifonctionnels (HADRIAN & SAM) ou pourraient surement le devenir (SKANSKA).

Cependant, ces robots doivent encore beaucoup évoluer s’ils désirent avoir une place importante dans le processus de construction car ils sont généralement bloqués par plusieurs éléments :

- **La mobilité des robots** : Un chantier est habituellement un lieu où il est peu aisé de se rendre et de se déplacer. Les robots sont limités par leur champ d’action et doivent donc se déplacer, contrairement à leur travail en usine où l’objet à usiner vient à eux. Il est par exemple impossible au robot SKANSKA de se rendre partout sur le chantier alors

que SAM nécessite l'installation de rails pour se déplacer et travailler. Dans beaucoup de situations, la hauteur du bâtiment va être un frein pour ces robots.

- **L'unicité du produit** : Les robots doivent être en mesure de s'adapter à l'ouvrage qu'ils construisent car chaque produit est unique. En effet, la spécificité de la construction est que chaque bâtiment, ouvrage d'art, etc. est entièrement dessiné par un architecte, étudié par des bureaux d'études et construit sur un terrain particulier. Le robot doit donc utiliser un modèle numérique lié à des algorithmes pour connaître les séquences de mouvements à réaliser et ne peut pas réaliser une séquence unique comme dans une usine de production.
- **Limitation au gros œuvre** : La réalisation d'un ouvrage est le résultat d'un grand nombre de disciplines : terrassement, gros œuvre, électricité, plomberie, mécanique, etc. Pour l'instant, les recherches se limitent principalement au gros œuvre (les gros travaux sur chantier) qui semblent être le domaine le plus facile à industrialiser.

L'analyse des recherches actuelles a permis de mettre en avant certaines difficultés pour industrialiser et robotiser la construction. Nous pensons que les drones et le BIM sont des possibilités pour se défaire de certaines contraintes. Ces deux idées vont être développées dans les sections suivantes pour bien comprendre l'apport qu'ils peuvent avoir dans cette course à l'industrialisation de la construction.

2.2 Les drones

Dans ce travail, le terme drone est employé pour parler des UAV (Unmanned Aerial Vehicles). C'est un aéronef sans humain à bord, se déplaçant dans les airs au moyen d'hélices. Cet appareil est capable de soulever des charges et de garder une position stable dans l'air.

De nombreuses recherches sont effectuées dans des domaines très diversifiés tels que la livraison de colis (a) [15], la réalisation de photos aériennes (b) [16] ou le développement de drones secouristes (c) [17]. La Figure 7 montre les exemples cités précédemment. Les dernières idées et inventions populaires en date sont l'utilisation de drones comme taxi à Dubaï [18] [19] et l'utilisation de drones pour faire des sauts en parachute. [20]

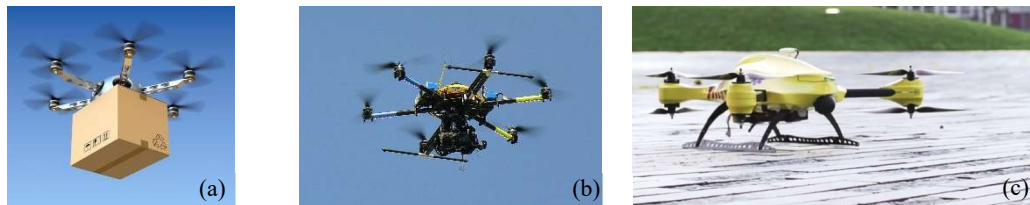


Figure 7 – Sujets de recherche avec les drones. [15] [16] [17]

Au sein de l'unité Génie Civil de l'EPL, des recherches sont réalisées sur l'utilisation de drones dans la construction. Afin de bien comprendre l'apport des drones dans le monde de la construction et les nouvelles contraintes qu'ils impliquent, voici quelques rappels sur les recherches qui ont été réalisées dans le monde et à l'UCL jusqu'à présent.

2.2.1 Recherches à travers le monde

Plusieurs universités, en collaboration avec d'autres partenaires, ont réalisé des recherches sur les drones pour bâtir des structures à échelle réduite, dans le but d'évaluer les capacités des drones et leurs besoins. Voici quelques explications et conclusions sur ces recherches.

2.2.1.1 The flight assembled architecture installation [21]

Ce projet a été développé par le professeur R. Andrea à l'école polytechnique de Zurich (ETHZ) en association avec le bureau d'architecture Gramazio Kholer. Le projet original « The Vertical Village » est la construction d'un village vertical de 600 mètres de hauteur et d'une exploration de la construction aérienne par des architectes. Ils pensent que l'utilisation de robots volants peut permettre aux architectes de ne pas se limiter aux zones de travail actuelles qui contraignent la taille des structures et les possibilités architecturales. Au moyen de drones, le projet a été réalisé à l'échelle 1/100 lors du salon « Fonds Régional d'Art Contemporain d'Orléans », en France.



Figure 8 – A gauche – « The Flight Assembled Architecture installation » de 6m de haut construite avec 1500 éléments et 4 quadricoptères. [21]

(Photo par François Lauginie)

Figure 9 – A droite – Deux quadricoptères construisant la maquette avec des modules de 30 cm de long. [21]

(Photo par François Lauginie)

En bref

- Structure composée de blocs légers (90g) et collés entre eux pour obtenir une stabilité générale.
- Utilisation de plusieurs quadricoptères (drones) simultanément.
- Utilisation de caméras pour déterminer la position des drones en temps réel.
- Les drones se rechargent automatiquement lorsqu'ils sont déchargés.
- Système d'anticollision entre les quadricoptères (1,5m de distance minimum entre eux).

En conclusion

L'utilisation de drones sur un tel projet semble évidente grâce à la simplicité du design. Les recherches et développements réalisés pour le drone, les algorithmes de placement et les éléments de construction ont été simplifiés grâce à la sobriété de la structure.

2.2.1.2 Architectural fabrication of tensile structures with flying machines [22] [23]

Dans ce projet également développé à l'ETHZ, les chercheurs essaient de découvrir les possibilités de réaliser une structure élastique avec des drones, en effectuant des analogies avec les méthodes de construction aérienne et de robotique existantes. Les drones sont employés pour dérouler des câbles dans l'espace afin de créer une structure filaire tridimensionnelle.



Figure 10 – Un drone construisant une structure avec un fil



Figure 11 – Construction par des drones d'une structure filaire avec un nouveau degré de liberté

En bref

- Utilisation très avantageuse de câbles : légers, résistants, longs.
- Câbles enroulés autour d'une roue sous le drone avec réglage de la tension du câble possible.
- Utilisation de caméras pour déterminer la position et l'orientation du drone.
- Communication entre les caméras, l'automate (algorithme sur un ordinateur) et le drone, pour calculer les trajectoires nécessaires et envoyer les commandes.

Conclusion : L'utilisation d'un matériau souple et léger mais très résistant permet d'imaginer de nouvelles structures. L'utilisation de plusieurs drones augmente le degré de liberté de la structure comme le montre la Figure 11.

2.2.1.3 Construction of Cubic Structures with Quadrotor Teams [24]

Dans cette publication, des chercheurs spécialisés en mécanique et en mathématiques appliquées de l'université de Pennsylvanie explorent un assemblage tridimensionnel de structures similaires à des échafaudages, grues tours, grattes ciel et pylônes à haute tension, en utilisant des robots volants autonomes.

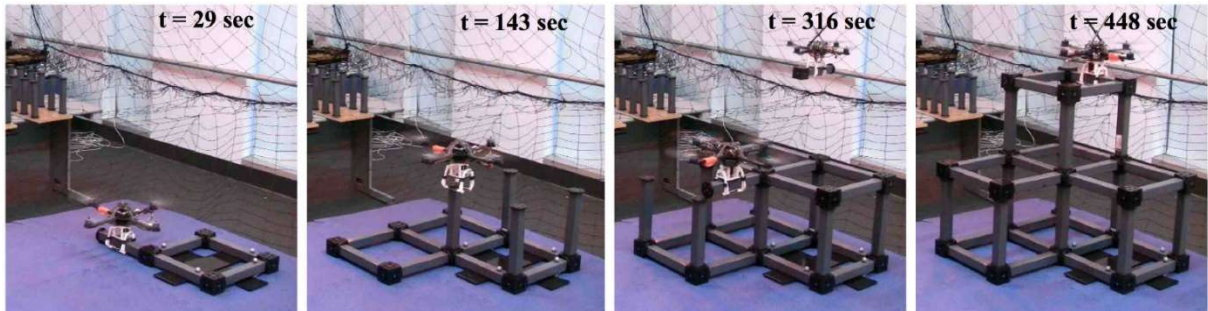


Figure 12 – Photos intermédiaire d'une pyramide construite par 3 quadricoptères.

En bref

- Structure composée de barres et de nœuds qui s'assemblent respectivement avec des enfoncements et des pointes arrondies associées à des aimants pour faciliter l'accroche.
- Le robot est équipé d'une pince pour saisir les éléments.
- Utilisation de plans digitaux.
- Transformation des plans en assemblage de simples structures cubiques.
- Algorithme de construction et schéma de contrôle calculé automatiquement.
- Changement des batteries manuellement.
- Réalisation de tests pour déterminer l'efficacité de plusieurs drones sur un seul projet.

En conclusion

Les ingénieurs ont adapté des éléments de construction aux capacités des drones, pour réaliser des structures cubiques classiques. L'ajout d'aimants à l'extrémité des éléments permet de gérer l'imprécision du drone au moment de l'assemblage.

Les tests réalisés pour analyser l'utilisation de plusieurs drones sur un projet mettent en évidence une possible saturation. La Figure 13 montre le temps passé par les drones dans les différents états et conclu que la durée minimale de construction est atteinte avec trois drones pour ce projet.

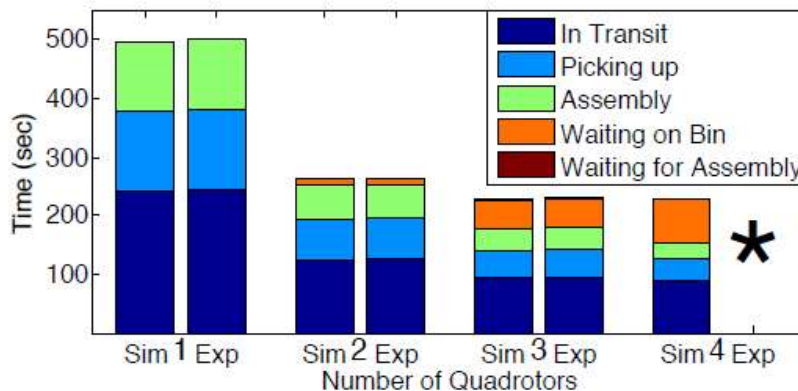


Figure 13 – Temps passé par les drones dans les différents états pendant la construction

2.2.1.4 Conclusion de ces études

Les expériences approfondies ci-dessus montrent que le drone bénéficie d'une liberté de déplacement encore jamais vue avec les robots ordinaires. Il est le premier robot à pouvoir se déplacer dans un espace considérablement plus grand que lui-même dans les trois dimensions spatiales (x, y, z).

Cette liberté de déplacement est possible grâce à l'utilisation de batteries fixées aux drones. Celles-ci ont pour le moment une capacité d'environ de 20 minutes à vide et 10 minutes avec charge, mais varient énormément avec le type de drone et le poids de la charge. De nombreuses recherches sur l'augmentation de la capacité des batteries sont réalisées et ce, dans de nombreux domaines autres que les drones.

Ces robots volants ont besoin de repères pour connaître leur situation dans l'espace. Dans les projets étudiés ci-dessus, les drones étaient suivis par des caméras qui déterminaient précisément leur position et la transmettaient à un ordinateur. Depuis ces informations et celles du plan de vol générées par les plans digitaux et des algorithmes, l'automate envoyait les instructions aux drones pour les déplacements et les actions à réaliser.

Dans chacun des projets présentés, il a été possible d'utiliser plusieurs drones simultanément grâce à des règles d'anticollision présentes dans les algorithmes. L'utilisation de plusieurs drones est une excellente nouvelle pour le développement à grande échelle puisqu'il permet de diminuer le temps de construction et d'augmenter le degré de liberté dans le design (ex. structures filaires). Il sera essentiel pour chaque projet d'étudier le nombre maximum de drones pouvant travailler en même temps afin d'atteindre la saturation et ainsi la vitesse maximale de construction.

Ces études confirment qu'il est possible d'assembler des éléments avec des drones de façon à construire des structures simples. Il est maintenant nécessaire de quitter le monde de l'échelle réduite et de développer des drones et des éléments de construction adaptés à des ouvrages de taille réelle. Les recherches réalisées au sein du pôle de GCE⁶ à l'EPL vont dans ce sens...

⁶ Pôle GCE : Pôle Génie Civil et Environnemental de l'Ecole Polytechnique de Louvain

2.2.2 Les recherches à l'EPL [25] [26] [27]

Si la modernisation de la construction sur chantier passe par la robotisation, le Professeur P. Lateur pense que les drones peuvent avoir un rôle important à jouer. C'est avec cette idée qu'il a commencé des recherches au sein de l'unité de Génie Civil à l'Ecole Polytechnique de Louvain-la-Neuve.

Dans un premier temps, il espère développer des éléments de construction adaptables à un drone pour construire des maisons unifamiliales à échelle réelle. Pour réaliser ce projet, plusieurs domaines ont besoin d'être étudiés : la conception de drones et leur automatisation et le développement de nouveaux éléments de construction. Les pages suivantes résument les recherches réalisées jusqu'à présent à l'EPL.

2.2.2.1 Les drones

Pour construire avec des drones, il est essentiel de concevoir de nouveaux éléments de construction, mais il est également indispensable de développer un drone adapté. Les recherches autour d'un drone relèvent plus de l'occupation d'ingénieurs électromécaniciens mais sont pour le moment réalisées au sein du pôle Génie civil avec l'aide de partenaires.

C'est dans cette optique que l'EPL a conçu un drone (voir Figure 14) pouvant porter des charges de 35 kilogrammes avec comme idée de pouvoir transporter 100 kilogrammes dans le futur.



Figure 14 – Drone développé par l'UCL

L'ajout d'une charge excessive vis-à-vis du drone modifie considérablement son équilibre et sa manœuvrabilité. Les essais réalisés avec des cônes conçus pour l'occasion ont permis de déterminer une tolérance de pose d'environ 5 centimètres. La Figure 15 montre des photos des essais réalisés à l'EPL avec le drone. La tolérance obtenue est le résultat de tests avec le drone et de recherches effectuées sur l'analyse des états de surface (dus à la qualité du béton) ainsi que des angles de frottements entre les éléments.



Figure 15 – Essai en laboratoire du drone avec des cônes en béton

Dans le but de réaliser des essais en laboratoire, un système de lasers réfléchissants sur les murs a été utilisé pour contrôler le drone automatiquement. D'autres recherches sont en cours pour développer un système de localisation par GPS dans le but de rendre plus facile l'utilisation du drone sur chantier.

Afin de déplacer les éléments drones compatibles, le drone doit être équipé d'un système de préhension. Comme les éléments sont en plein développement, le drone est muni d'un électroaimant permettant de porter des éléments de formes variables. Lorsque les recherches auront abouti, un préhenseur idéalement mécanique, devra être conçu.

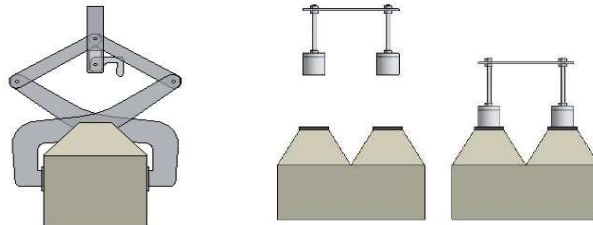


Figure 16 – Système de préhension (a) par pince (b) par aimant

2.2.2.2 Droxels

Le Droxel est un élément de construction qui a été développé dans le but de répondre à un ensemble de critères (poids, angles d'inclinaison, tolérance) permettant aux drones de le déposer avec une certaine imprécision et de former des assemblages tels que des murs. Il a pour grand avantage de pouvoir réaliser des porte-à-faux grâce à sa forme complexe et d'être multidirectionnel grâce à sa double symétrie.

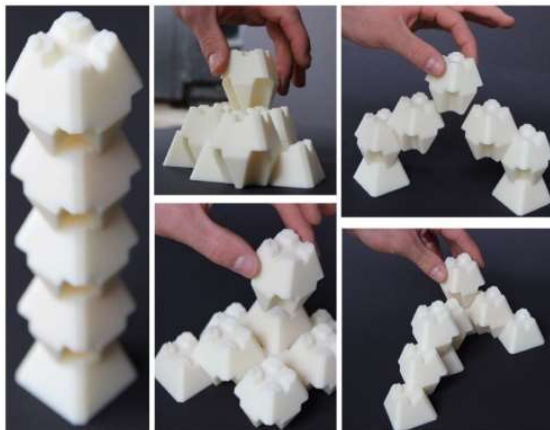


Figure 17 – Droxels : type de dricks conçu par l'UCL

La version actuelle des Droxels ne leur permet pas d'être assemblés par le drone contrôlé manuellement. Des études approfondies vont être réalisées pendant l'année académique 2017 – 2018 afin de les rendre « drones compatibles ». De plus, l'automatisation prévue du drone va peut-être permettre d'augmenter la précision de pose et ainsi de les rendre « drone compatibles ».

2.2.2.3 Dricks Light Plus

En parallèle aux Droxels, d'autres éléments de construction avec une forme extérieure plus classique ont été étudiés. Les dricks LP (Light Plus) sont le résultat de trois années de recherches au sein du pôle Génie Civil de l'EPL. La forme définitive actuelle a été développée par J-F. Leboutte et V. Parisel dans le cadre de leur mémoire « développement d'un système constructif "drone-compatible" pour la construction de maisons unifamiliales en béton et en maçonnerie » réalisé pendant l'année académique 2016 – 2017. Afin de répondre aux différents besoins d'une maison unifamiliale classique, plusieurs

types de blocs ont été dessinés (briques normales, briques de coins, linteaux, etc.) et sont visibles à la Figure 18.

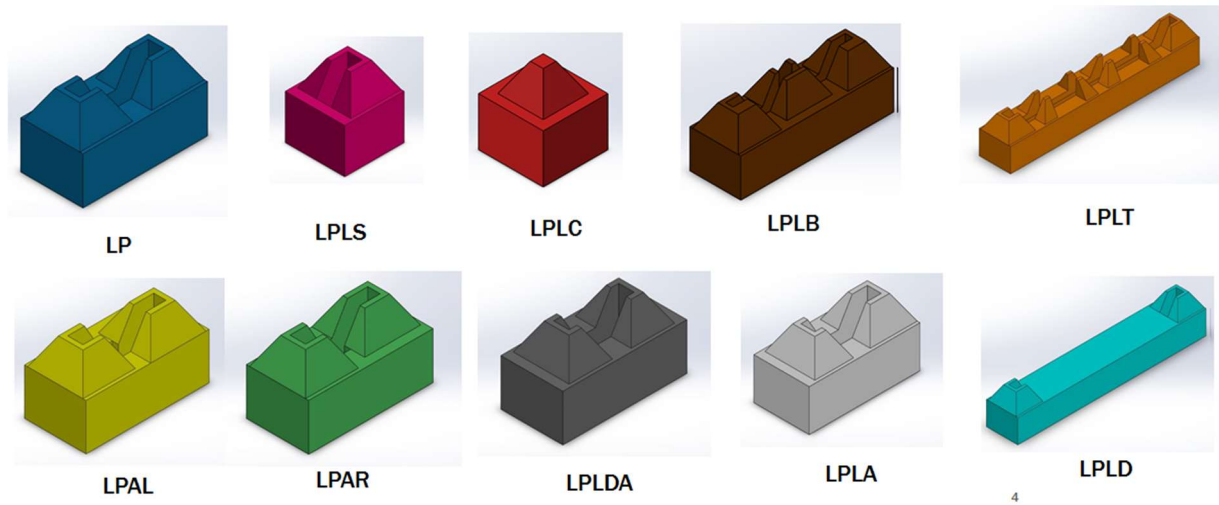


Figure 18 – Dricks Light Plus développés en 2016-2017

2.2.2.4 Etudes théoriques automatisations

Des recherches théoriques⁷ ont également été réalisées afin de concevoir une maison drone compatible au moyen d’une interface accessible sur internet. Lorsque l’opérateur dessine un mur ou un plancher sur l’application, le programme transforme respectivement ces éléments en briques et en un système de poutres – claveaux. Les éléments utilisés sont standardisés et doivent garder un rapport de 2 entre la longueur et la hauteur. Cette application permet également de déterminer la trajectoire la plus courte du drone entre chaque action qu’il doit réaliser. L’addition de toutes les trajectoires et actions du drone permet de calculer le temps nécessaire pour construire la maison entièrement.

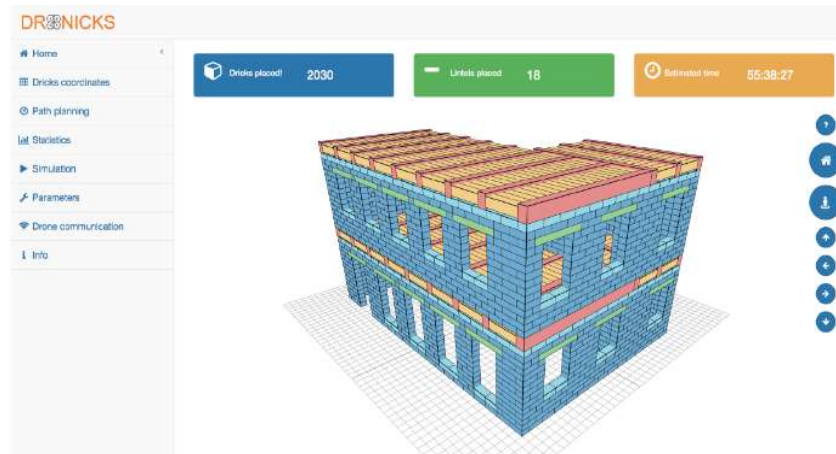


Figure 19 – Visualisation d'un projet sur le programme Dronicks

Cette application offre de nombreuses fonctionnalités mais son utilisation reste malheureusement limitée à cause de la non paramétrisation des éléments disponibles et de sa non-compatibilité avec les logiciels de construction existants.

⁷ Recherches réalisées dans le mémoire : « Development of elementary BIM tool for « drone compatible » construction systems » écrit par Milan Reniers [35]

2.2.2.5 Conclusion

Lors des trois premières années de recherche à l'EPL sur la construction avec des drones, les étudiants et le corps académique ont particulièrement travaillé sur le développement d'éléments « drone compatible ». Le drone conçu et utilisé jusqu'à présent montre ses limites pour les déplacements. Il est maintenant nécessaire que le drone soit automatisé afin de déplacer les éléments de manière automatique et non plus manuellement si les recherches veulent passer un cap.

2.2.3 La construction par les drones de demain

L'ensemble de ces recherches prouve actuellement qu'il est possible de construire des structures à échelle réduite avec des drones, à condition d'adapter les éléments aux capacités du drone. Les recherches de l'UCL, qui visent plus particulièrement la construction de maisons unifamiliales, devraient pouvoir présenter des résultats concrets prochainement quant à l'utilisation de drones pour des constructions à échelle réelle.

Suite à ces recherches, il est maintenant concevable que les drones fassent partie des robots qui vont révolutionner l'industrialisation de la construction sur chantier. En effet, la liberté de ses mouvements lui confère un avantage substantiel par rapport aux autres robots. Néanmoins, il est nécessaire de rappeler ses limites qui ne sont pas négligeables. Ses trois principaux défauts sont : sa limite de poids pour transporter les éléments, sa tolérance pour les déposer et sa capacité très faible d'agir sur un élément déjà en place. En effet, le drone (non accroché à un mur ou autre système développé) est un robot volant qui n'a comme appui que l'air, ce qui l'empêche d'exercer des forces élevées sur un objet. Cela lui permet uniquement de soulever des charges limitées et de les déplacer sans exercer de force sur d'autres éléments.

L'utilisation des drones oblige les éléments de construction à redevenir petits et facilement emboîtables, ce qui va dans la direction opposée de l'industrialisation de la construction d'aujourd'hui qui essaie de préfabriquer des éléments de plus en plus grands. Ces éléments préfabriqués sont limités par la taille des semi-remorques nécessaires pour les déplacer.

Pour que les drones puissent être efficaces sur un chantier, il est indispensable qu'ils ne soient plus contrôlés par des opérateurs. Il est de première nécessité qu'ils soient connectés à un programme qui lui envoie les séquences à réaliser pour être automatisé. Un système d'anticollision est également primordial pour que plusieurs drones puissent travailler en même temps. Avec l'unicité de chaque produit (ouvrage unique produit par un architecte, etc.) à réaliser, il devient inévitable de le modéliser dans un programme 3D pour définir toutes les informations nécessaires au bon fonctionnement des drones.

2.3 Le BIM, l'ouverture de la construction aux robots⁸

La robotisation de la construction continue de se développer principalement dans les usines et les centres de préfabrication. Cependant, ils sont présents essentiellement pour le gros œuvre, la conception de panneaux en bois et pour tous les éléments de construction.

Si l'industrialisation désire se développer dans toutes les étapes des projets et dans tous les secteurs, il est nécessaire que des robots fassent leur apparition directement sur les chantiers. Afin que ces robots soient opérationnels, ils ont besoin de connaître toutes les actions qu'ils doivent effectuer. Pour cela ils utilisent un modèle 3D relié à un automate.

Si l'utilisation d'un modèle 3D paraît évident pour utiliser les robots sur chantiers, il est encore plus évident qu'un modèle 3D ne suffit pas pour répondre à l'ascension des technologies sur chantier et qu'il est donc indispensable d'utiliser un modèle BIM. Ce chapitre démontre l'intérêt de l'utilisation d'un modèle BIM et de la méthodologie BIM complète sur les chantiers qui auront recours à des robots.

2.3.1 Définition des standards

Dans le cas d'un projet de construction classique, l'architecte dessine un projet pour le maître d'ouvrage qui fait ensuite un appel d'offres. L'entreprise générale arrive donc plus tard sur le projet et en accord avec le maître d'ouvrage et l'architecte, décide de la méthode de construction.

Pour le cas de projets réalisés au moins partiellement avec des robots, il va être nécessaire que l'entreprise générale et les autres acteurs soient impliqués dès le début du projet. En effet, l'utilisation de robots sur chantier risque de changer certaines techniques de construction et ainsi influencer l'architecte dans la conception de l'ouvrage. Il est donc indispensable de définir les standards des robots dès le début du projet. La méthodologie BIM, principalement axée sur la collaboration entre les différents partenaires, va permettre de définir un cahier des charges précis approuvé par tous les partenaires.

Afin de mieux comprendre l'influence qu'un robot peut avoir sur la conception d'un ouvrage, voici deux exemples de cas concrets où les robots modifieraient les projets :

1. Longueurs des murs

Un mur peut être réalisé de 3 façons différentes :

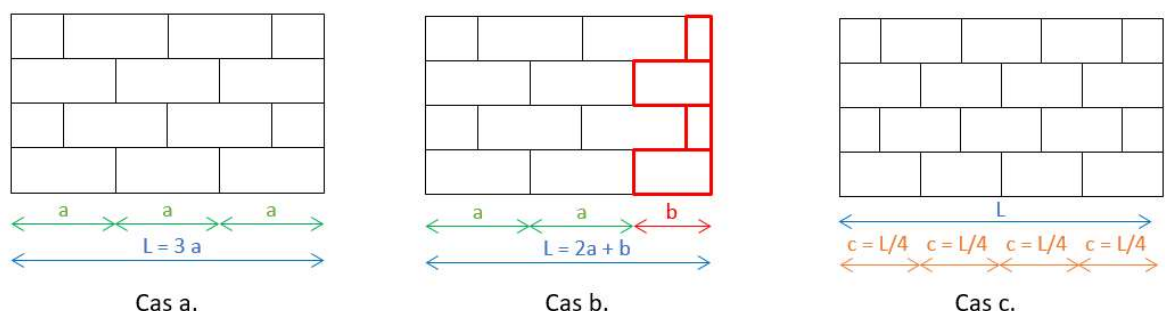


Figure 20 – Divisions possibles d'un mur

- a. Les murs sont proportionnels à une taille de brique sélectionnée.

⁸ Dans ce chapitre, l'utilisation du terme « robot » est utilisé pour généraliser les principes d'industrialisation de la construction. Ce terme peut simplement être remplacé par le mot « drone » pour rentrer dans le cadre plus spécifique des recherches à l'EPL.

- b. Les murs ont des dimensions de taille aléatoire avec une brique de taille variable à la fin du mur (briques rouges).
- c. Les murs ont des dimensions de taille aléatoire mais toutes les briques sont fabriquées proportionnellement à la longueur totale.

Dès le début du projet, l'architecte, le fournisseur et l'entreprise générale doivent se mettre d'accord sur ce que le robot va savoir réaliser. S'il est limité au placement de blocs identiques seulement, les cas a) et c) seront privilégiés. S'il est capable d'adapter son système de manutention à des blocs différents, le cas b) sera envisagé. C'est une problématique sur laquelle on ne se serait pas penchée dans le cas d'un chantier « traditionnel » mais qui nécessite d'être étudiée dans la cas d'un chantier avec des robots. Ainsi l'architecte sait ce qu'il peut dessiner.

2. Anticipation d'une activité succédant le gros œuvre : Installation des MEP⁹

L'entreprise générale, son sous-traitant et son fournisseur doivent décider suffisamment tôt dans le projet comment vont se faire les passages des tuyaux, des gaines électriques, etc. à travers les murs. En effet cette information va modifier les instructions du robot lors de la construction du gros œuvre puisqu'il aura les deux possibilités suivantes :

- a. Laisser un espace libre entre deux briques puis obturation plus tard.
- b. Poser des briques personnalisées par le fournisseur.

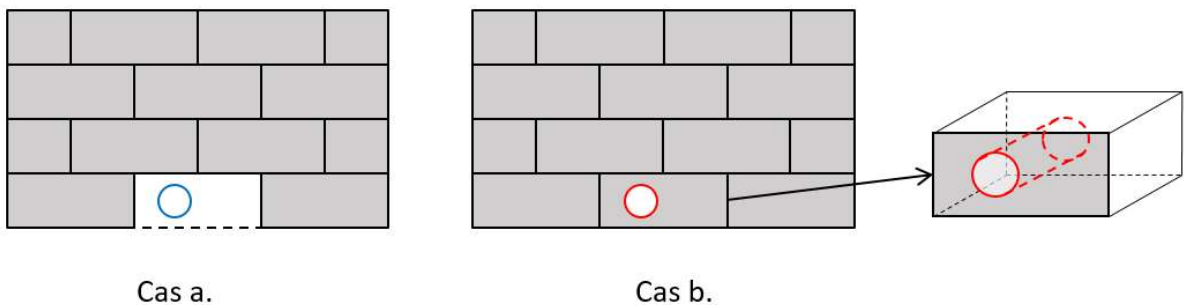


Figure 21 – Possibilités pour passer les MEP à travers un mur

Ces exemples montrent qu'une collaboration active de tous les intervenants est nécessaire dès le début du projet et cela peut se faire aisément en utilisant la méthodologie BIM.

2.3.2 Une utilisation efficace des modèles 3D

La méthodologie BIM est une méthode de collaboration active entre les partenaires, réalisée autour d'un modèle 3D intelligent orienté objets, appelé modèle BIM. Ce modèle contient toutes les informations du projet et va grandement faciliter le travail de chaque acteur.

Lorsqu'un BIM de niveau 2¹⁰ est utilisé sur un projet (le plus courant actuellement), l'architecte réalise la maquette originale qui définit le design du bâtiment. A partir de cette maquette, chaque partenaire crée sa propre maquette pour y ajouter ses éléments.

Voici quelques avantages de l'utilisation d'un modèle BIM avec les robots :

⁹ MEP : Raccourci pour parler d'éléments mécanique, d'électricité et de plomberie dans le domaine de la construction

¹⁰ BIM de niveau 2 : Voir annexe pour plus d'information 7.1 « Qu'est-ce que le BIM ? »

2.3.2.1 Maquette « robot compatible »

Dans le cas où certains partenaires veulent travailler avec des robots, il est nécessaire de transformer leur maquette « classique » en maquette « robot compatible »¹¹. Cela pourra être fait au moyen de logiciels ou plugins directement intégrés dans les logiciels de 3D (Revit®, Archicad®, etc.) tel que « Dyna'Drone » présenté dans ce mémoire (chapitre 4) qui transforme le gros œuvre en éléments « drone compatible ». Il est possible de récupérer la position de chaque élément ainsi que toutes ses propriétés nécessaires pour la mission du robot (type, poids, longueur, orientation, etc.).

Afin de pouvoir automatiser les robots, il est également nécessaire de concevoir les lieux de stockage des matériaux sur le modèle 3D. L'état des stocks devra être automatisé afin que le robot soit averti de l'emplacement exact des éléments à saisir.

2.3.2.2 Connexion des maquettes

L'utilisation de robots par certains partenaires sur chantier va bouleverser les techniques de construction. Il est primordial de vérifier la compatibilité des maquettes avant le début des travaux. En utilisant le BIM, il sera aisé de superposer les maquettes afin de visualiser le résultat final et ainsi vérifier leurs concordances (réalisation d'un *clash control* par exemple). La Figure 22 illustre le principe de superposition des maquettes pour en obtenir une seule.

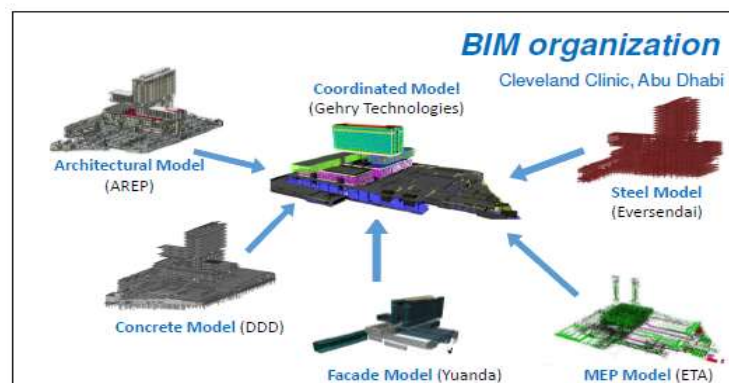


Figure 22 – Superposition des maquettes de chaque intervenant [9]

2.3.2.3 Coordination des robots

L'utilisation de robots sur chantier passe logiquement par leur automatisation. Il est très facile de coordonner un ou plusieurs robots sur un chantier si leurs missions sont concentrées dans un seul et même modèle 3D, ce qui est exactement le cas d'un modèle BIM.

Pour qu'un robot puisse travailler sur un chantier, il a besoin de savoir en temps réel quel est l'avancement du projet pour savoir la prochaine mission qu'il doit réaliser.

En revanche, si plusieurs robots sont utilisés sur un projet, chaque robot doit avoir plusieurs informations pour savoir la prochaine mission qu'il doit réaliser :

- Quel est l'avancement du projet
- Quelle mission peut-il effectuer (possibilité par rapport à ce qui est déjà construit)
- Quelle tâche doit-il effectuer (afin de ne pas bloquer les autres robots dans leur avancement)
- Où sont les autres robots (intégration d'un système anticollision)
- Que font les autres robots afin de prévoir les actions suivantes.

¹¹ Robot compatible : Des éléments de construction sont considérés comme « robot compatible » quand ils sont adaptés au robot pour leur mise en œuvre.

Qu'il n'y ait qu'un seul robot qui travaille sur le chantier ou que le chantier soit entièrement robotisé, le robot doit connaître l'avancement exact du projet pour réaliser sa mission. Seule l'utilisation d'un modèle BIM, avec les maquettes de tous les acteurs, mis à jour régulièrement, peut répondre à cette problématique. L'utilisation de nouveaux plugins sur les logiciels de modélisation sera indispensable pour coordonner efficacement les robots.

Avant d'arriver à une construction entièrement robotisée et automatisée, le monde de la construction passera sûrement par des étapes intermédiaires où les robots et les ouvriers travailleront en même temps sur un chantier. Si l'idée peut paraître dangereuse, le placement d'une puce sur les ouvriers par exemple, pourrait permettre au modèle 3D de savoir où les ouvriers travaillent et sur quoi en fonction de l'avancement de la maquette. La maquette BIM utiliserait ces informations pour envoyer le robot travailler dans une zone suffisamment loin des ouvriers afin qu'ils travaillent en toute sécurité.

2.3.2.4 Autres fonctionnalités

L'utilisation d'un modèle BIM avec les robots peut apporter de nombreuses fonctionnalités supplémentaires non négligeables et ne demandant pas un travail conséquent.

- Grâce à l'automatisation des robots avec le modèle BIM, le programme connaît exactement l'enchaînement des missions et le temps nécessaire pour les réaliser. Ces informations vont permettre de réaliser facilement une 4D¹² du projet et d'estimer le temps nécessaire à la construction de l'ouvrage.
- Les robots, pour réaliser leurs missions, ont besoin d'un modèle 3D à jour. Ainsi, toutes les modifications, réalisées en cours de projet avant leurs exécutions, seront encodées dans le modèle BIM. A la fin du chantier, s'il n'y a pas eu de modification par un ouvrier non répertoriée dans le modèle, le modèle BIM sera le modèle 'as built' et sera à jour : fait rare dans la construction aujourd'hui.
- L'ensemble des informations recueillies par le modèle BIM sur les robots permettra d'évaluer l'impact environnemental des robots sur le chantier et de le comparer aux prévisions réalisées. Il sera intéressant de savoir si l'utilisation de robots (souvent électriques) permet de diminuer considérablement l'impact écologique des chantiers.

2.3.3 En attendant la robotisation totale

Avec la complexité des chantiers qui ne cesse d'augmenter et les délais de construction qui diminuent, les acteurs de la construction vont devoir travailler avec la méthodologie BIM. Si cette méthode n'est pas encore obligatoire pour les projets de construction classique, elle va le devenir avec l'apparition de robots sur les chantiers. En effet, le robot est dépendant d'un automate, relié lui-même au modèle représentant le produit qu'il doit réaliser (l'ouvrage) et qui est généralement un modèle 3D. Ce modèle 3D pourrait être directement obtenu à partir du modèle BIM commun à tous les partenaires et ainsi diminuer considérablement le temps nécessaire pour installer le robot sur le chantier.

Si la robotisation sur chantier se développe rapidement, le développement de robots avec le BIM leur permettrait d'être fonctionnels rapidement. Dans le cadre de recherches comme à l'UCL, des démonstrations avec des drones associés à un modèle BIM, seraient une belle publicité pour le projet auprès du secteur de la construction.

¹² Dans un modèle BIM, la 4D caractérise la notion de temps sur le projet.

2.4 Quel futur pour la robotisation ?

2.4.1 Les limites actuelles de la robotisation

La robotisation des chantiers changerait radicalement le visage de la construction car les robots apporteraient sur le chantier toutes leurs précision et rapidité d'exécution, bien exploitées dans les usines. Ces points forts, associés à un fonctionnement intensif (24h/24 et 7j/7), permettraient de raccourcir les délais de construction des ouvrages et augmenteraient leur qualité. La robotisation des chantiers est cependant confrontée à deux problèmes majeurs que sont la mobilité des robots et l'unicité du produit à réaliser.

Le drone est une solution envisageable pour répondre à ce premier problème mais semble limité par d'autres paramètres tels que la charge qu'il peut embarquer, sa tolérance de déplacement et sa capacité à agir sur des éléments fixes¹³.

Quant au BIM, il répond particulièrement bien à la deuxième problématique. La collaboration entre les différents acteurs dès le début d'un projet et la collaboration des robots grâce à la maquette BIM, devraient grandement faciliter la réalisation de tâches automatisées sur un chantier malgré, la non répétitivité d'une séquence en un lieu unique, comme en usine.

Malgré la vitesse de développement des technologies actuelles, il est peu probable dans un futur « proche » que les robots soient capables de bâtir des ouvrages sans l'aide d'ouvriers. Cette vision ne semble toutefois pas la plus judicieuse. L'exemple de l'engin de chantier développé par KOMATSU allie parfaitement les capacités du robot et celle de l'opérateur : l'engin est plus précis et plus efficace grâce à l'utilisation du modèle BIM, et la sécurité est de mise grâce à la présence d'un opérateur. L'inconvénient de cette solution vis-à-vis de l'industrialisation est la nécessité d'avoir un opérateur 24h/24 et 7jrs/7. Cet exemple montre la possibilité d'assister l'ouvrier avec des robots comme cela se fait dans la médecine aujourd'hui. Cette idée est peut-être la solution la plus adaptée à la construction.

¹³ Par exemple, il est pour le moment impossible pour un drone de forer un trou dans un mur.

2.4.2 L'innovation pour la robotisation

Aujourd'hui, les tâches de chaque intervenant dans un processus de construction sont trop rigides et isolées de celles des autres. Chacun réfléchit de son côté au projet et puis seulement les différents acteurs essayent d'agir ensemble. Mais, si on veut révolutionner la construction, il faut collaborer plus tôt.

Il est temps d'arrêter de ne penser qu'entre ingénieurs et d'imaginer des solutions traditionnelles et classiques. Il faut arrêter d'essayer d'industrialiser la construction simplement en remplaçant ou en assistant l'ouvrier afin d'augmenter la productivité et diminuer les coûts. Si les techniques de construction n'ont quasiment pas changé depuis 2000 ans, ce n'est pas innocent.

Il est également temps que les architectes intègrent mieux les contraintes techniques de la construction dans leurs réflexions, plutôt axées de nos jours sur l'aspect architectural et sur la fonctionnalité du bâtiment.

Il est donc nécessaire de faire collaborer l'ingénieur et l'architecte afin qu'ils forment un binôme semblable au rôle de l'architecte à l'époque des pyramides. Celui-ci était lui-même l'architecte qui dessinait l'ouvrage, l'ingénieur qui étudiait la stabilité et l'inventeur des machines nécessaires pour concevoir l'ouvrage. Il est inévitable aujourd'hui de réaliser une grande remise en question des techniques actuelles de la construction pour l'industrialiser. Des équipes pluridisciplinaires sont indispensables afin d'arriver à innover et voir plus loin (*thinking out of the box*). Cela permettra peut-être de révolutionner la construction et de l'industrialiser entièrement.

L'innovation technique va de mise avec l'innovation du design !

2.4.3 Recherches à l'UCL avec les drones

Il est essentiel de continuer les recherches à l'UCL et ailleurs, afin de diminuer les délais de construction et d'augmenter la qualité des ouvrages. Est-ce que la solution est de robotiser les chantiers ? **Peut-être**, mais alors il faut changer l'approche de cette robotisation et voir plus large. Le chapitre suivant propose des pistes de recherche plus concrètes pour répondre à cette problématique.

Chapitre 3

Des projets pour innover

SOMMAIRE

- 3.1 Introduction
- 3.2 La Dron'house
- 3.3 Le protocole BIM/Plan d'exécution
- 3.4 Révolution de la construction



3 Des projets pour innover

3.1 Introduction

Les recherches sur la construction avec des drones à l'EPL arrivent à un stade où elles nécessitent de nouveaux plans d'action. Voici un résumé des résultats obtenus grâce aux recherches et mémoires réalisés depuis trois ans :

1. Les éléments de construction « drone compatible » arrivent à maturité pour la réalisation d'une maison traditionnelle unifamiliale.
2. Un drone adapté à ces éléments de construction est également opérationnel et ne nécessite plus que l'automatisation de ses mouvements.
3. Des programmes et algorithmes sont prêts à être utilisés pour transformer des modèles 3D dessinés sur Revit© en instructions pour le drone.

Il est nécessaire aujourd'hui de voir plus loin pour que le développement des robots dans les projets de construction devienne concret. Pour cela, il est indispensable de travailler dès demain dans deux directions. La première est la concrétisation des recherches résumées ci-dessus, par la construction d'une structure avec un drone de façon 100% automatique. La seconde est beaucoup plus abstraite et consiste à imaginer de nouveaux concepts de construction applicables pour les drones et les robots dans le but d'industrialiser la construction sur chantier. La Figure 23 résume par un schéma l'avancement des recherches sur les drones développés ci-dessus et les directions possibles à suivre.

La suite de ce chapitre est consacrée à la mise en place de ces deux projets au sein du pôle GCE de l'EPL. Il tiendra compte des avancées actuelles réalisées jusqu'à la fin d'année académique 2016 – 2017.

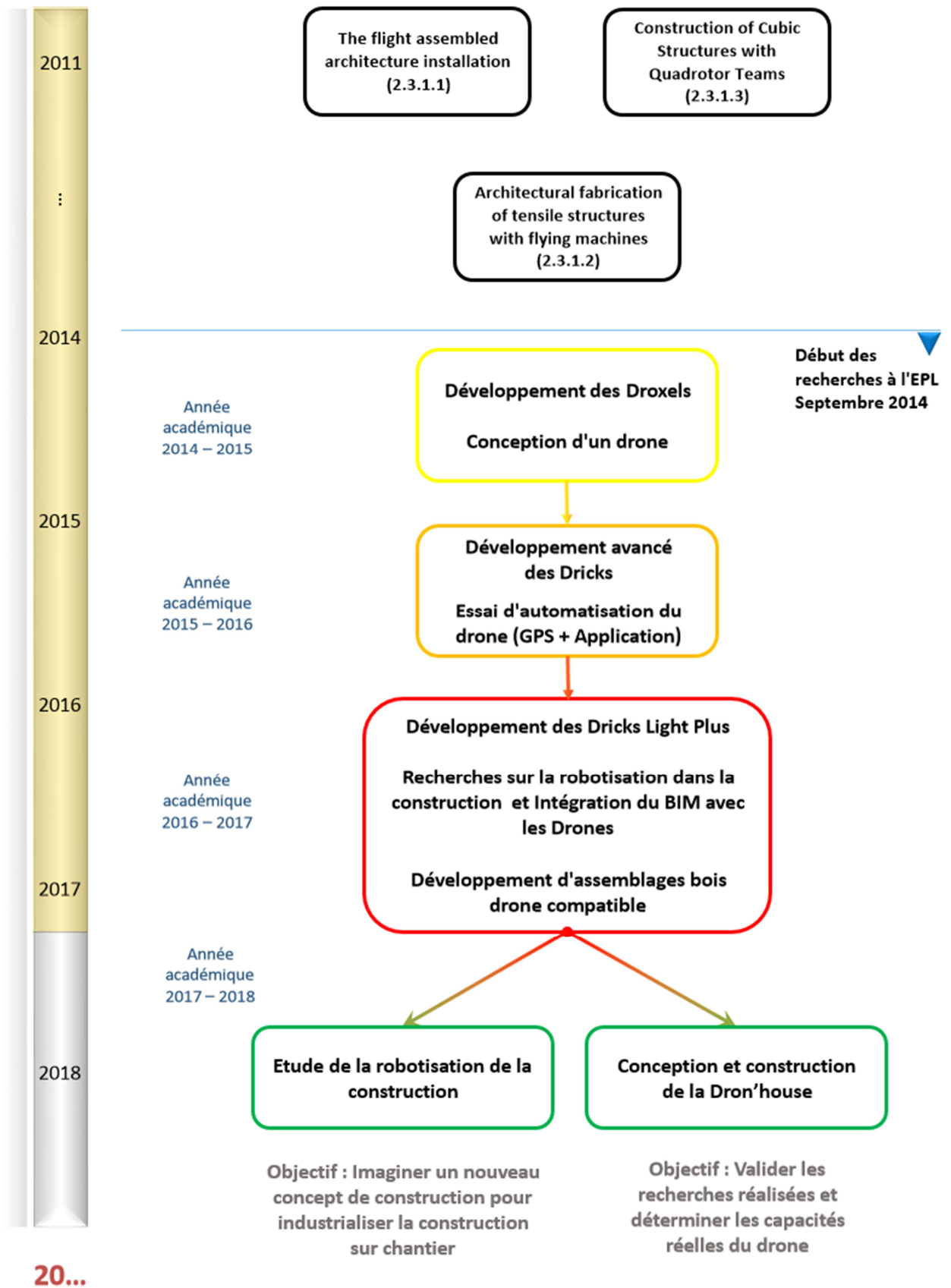


Figure 23 – Timeline des recherches au sein du pôle GC à l'EPL

3.2 La Dron'house

3.2.1 Le challenge

La Dron'house est le projet à construire pour concrétiser les recherches à l'EPL. Cette petite maison sera construite en plusieurs étapes qui seront précisément définies en cours de projet. La Figure 24 montre une succession d'étapes possibles sans aucune obligation et ressemblance nécessaire.

Le projet élaboré dans ce mémoire se veut ambitieux et s'instaure au sein d'un développement à long terme entre la construction et les robots. Dans ce souhait de façonner et de se développer dans le futur, le projet se doit d'être à la pointe de la technologie grâce à l'utilisation du BIM. Cette méthodologie va être essentielle pour automatiser le drone et faire collaborer l'ensemble des acteurs qui vont travailler sur le projet.

Le projet a pour ambition d'être fini pour la fin de l'année académique 2017 – 2018.

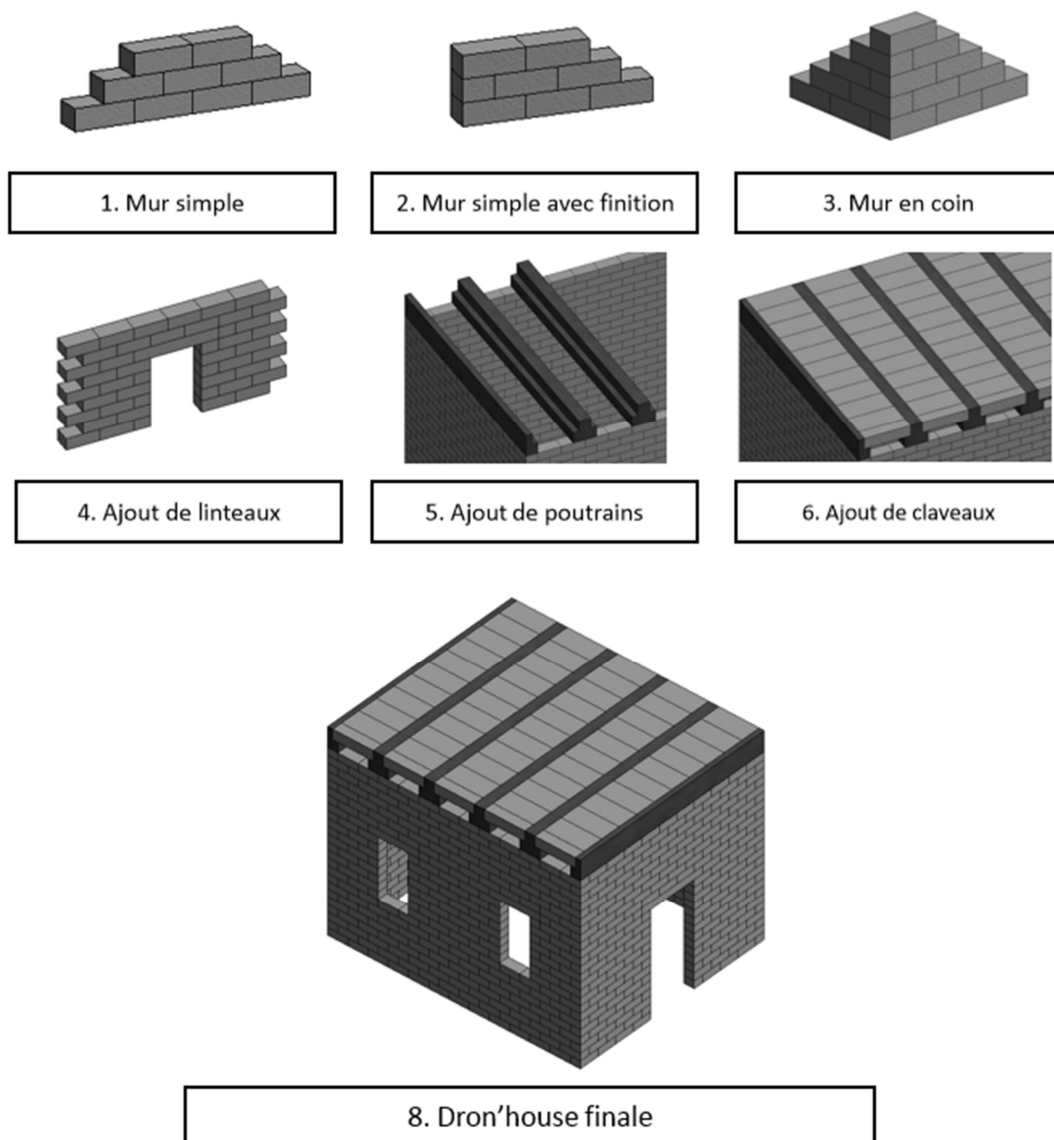


Figure 24 – Plan d'avancement de la construction de la Dron'house

3.2.2 Les objectifs

La construction de cette maison relève d'un grand challenge par tous les membres de l'équipe, aussi bien les professeurs que les techniciens de laboratoire et les étudiants. La concrétisation des recherches depuis trois ans va permettre de répondre à plusieurs interrogations sur la construction avec des drones à une échelle réelle. Les objectifs du projet sont :

- Définir les paramètres du drone automatisé :
 - Précision sans charge.
 - Précision avec les Dricks LP.
 - Attitude avec les Dricks LP.
 - Vitesse de travail réelle.
 - Attitude totale du drone lors de la construction de la Dron'house
- Juger l'efficacité des Dricks développés :
 - Pente.
 - État de surface.
 - Poids.
- Analyser l'automatisation :
 - Transformation du modèle 3D en modèle 3D « drone compatible ».
 - Détermination des coordonnées des éléments à placer pour le drone.
 - Echange des informations avec le drone.

3.2.3 Organisation

Pour réaliser ce challenge, le projet a été séparé en plusieurs parties ; deux pour cette année académique (2016 – 2017) et deux pour la prochaine¹⁴, réparties en trois mémoires (2017 – 2018).

Pendant l'année académique 2016 – 2017, deux mémoires¹⁵ ont travaillé sur la construction de maisons en béton et maçonnerie avec les drones :

- **« Développement d'un système "drone compatible" pour la construction de maisons unifamiliales en béton et maçonnerie »** réalisé par Jean-François Leboutte et Vincent Parisel. Ils ont pour but de développer les dricks définitifs qui seront utilisés pour la construction d'une maison unifamiliale avec des drones.
- **« L'étude de faisabilité de l'intégration de la construction "drone compatible" au sein d'un modèle BIM »** réalisé par Anne-Sophie Branders et Antoine Bruneau (ce mémoire-ci). L'objectif de ce mémoire par rapport au projet est de déterminer la démarche à suivre par l'écriture d'un protocole BIM et de donner un outil pour décomposer une maison sur Revit© en éléments « drone compatible ».

Lors de l'année académique 2017 – 2018, trois mémoires vont être impliqués dans le projet de la Dron'house :

- Architecture : « Design de la Dron'house & Recherche d'un nouveau concept de construction robotisée¹⁶ ».
- Génie-Civil : « Développement d'éléments « drone compatible » pour les planchers & Gestion de la construction de la Dron'house ».

¹⁴ Le projet est divisé en deux parties ; développement du drone et conception et construction de la Dron'house détaillé dans la section « 3.3.3 »

¹⁵ Le mémoire sur les drones « Étude de faisabilité de structure en bois "drone-compatible" ne travaille pas dans le cadre de ce projet.

¹⁶ La deuxième partie du mémoire est en rapport avec le 2^{ème} projet expliqué dans la partie « 3.4 »

- Electromécanicien : « Développement d'un système GPS et automatisation des trajectoires du drone en connexion avec le logiciel ©Revit »

Les différents acteurs de ce projet auront pour objectif de collaborer activement en utilisant le BIM. Leur rôle, leurs tâches et leurs échanges sont décrits plus précisément dans un protocole BIM disponible à la partie 3.3 de ce chapitre.

3.2.4 Le planning général

Un planning général a été établi afin que tous les membres du projet connaissent les deadlines des différentes parties du projet. Un planning plus détaillé est présent dans le protocole BIM.

Juin 2016 (Sujet de l'année académique 2016 – 2017)

- Fin du développement des dricks pour les murs afin qu'ils soient prêts à être fabriqués en grande quantité (conception + essais).
- Développement du logiciel de programmation pour transformer des structures dessinées sur ©Revit en éléments drone compatible (ce mémoire-ci).
- Réalisation d'un protocole BIM prêt à l'emploi (ce mémoire-ci).

Décembre 2017

- Trajectoire des drones entièrement automatique.
- Fabrication des dricks nécessaires pour la Dron'house.
- Conception de la Dron'house.
- Développement des éléments de toit drone compatible.

Juin 2018

- Essais sur les éléments de toit drone compatible.
- Construction de la Dron'house
- Analyse des « résultats » obtenus.

3.2.5 Paramètres et limitations

Dans l'optique de rendre le projet réalisable au sein de l'EPL, des paramètres et des limites sont fixés au début du projet dans ce document. Ces contraintes pourront varier en fonction de l'avancement du projet.

- **Les paramètres**
 - La Dron'house sera construite en utilisant le drone développé à l'EPL capable de transporter des charges d'environ 35 kilogrammes. L'utilisation d'un seul drone ne permettra pas une construction rapide de la maison mais simplifiera l'automatisation.
 - La structure de la Dron'house sera simple : elle sera composée de murs avec des fenêtres possibles et d'une toiture plate. Les éléments pour la construire sont des éléments « drone compatible » développés par l'EPL.
 - Les informations envoyées aux drones devront provenir du modèle 3D dessiné sur le logiciel ©Revit par les étudiants architectes.
 - Le projet sera réalisé dans le laboratoire de l'unité Génie Civil de l'EPL permettant d'avoir des conditions idéales de vol (absence de vent, pluie et neige). Les horaires de vols seront conditionnés par les horaires d'ouverture du laboratoire.
 - Une topographie 3D de la zone de vol du drone est requise. Celle-ci permettra au drone de connaître son espace de vol afin de ne rien heurter ; la Dron'house, les limites de la zone,

l'emplacement d'éléments durables (ex. les stocks), etc. La Figure 25 schématise un espace de vol pour le drone.

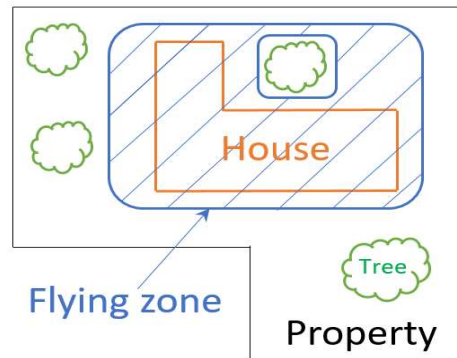


Figure 25 – Description de la zone de vol

- Le modèle 3D devra contenir l'emplacement des stocks de blocs afin de transmettre les coordonnées au drone. Un nouveau système de stockage doit peut-être être étudié pour s'adapter au système de préhension du drone.
- Il est nécessaire de développer un procédé pour placer la première rangée de blocs au sol en tenant compte de la tolérance de pose du drone.

• **Les limites**

- Des limites spécifiques au drone de l'EPL ont été établies grâce aux expériences réalisées depuis 3 ans.
 - Le drone peut porter des charges de 35kg maximum.
 - Le drone a une précision de pose d'environ 5 cm manuellement. La précision avec un guidage automatique n'a pas encore été déterminée.
 - Les éléments doivent être assemblés en étant déposés les uns sur les autres. Il est impossible d'insérer un élément depuis le côté ou entre deux éléments déjà en place. La Figure 26 schématise le cas décrit.

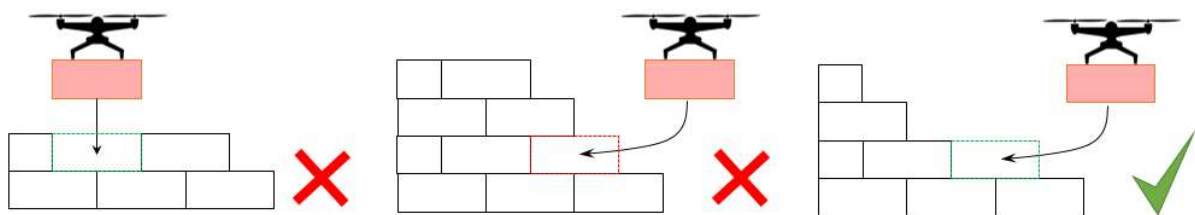


Figure 26 – Technique d'assemblage possible

- Les murs seront composés de blocs assemblés sans liant pour les maintenir ensemble.
- Les murs et les fenêtres seront dimensionnés afin d'être proportionnels à la taille du type de bloc (ou demi bloc si disponible) choisi afin d'éviter toute découpe compliquée.
- Dans le cas où des éléments plus lourds sont nécessaires, tels que des poutres pour soutenir des claveaux, il est envisageable de les déposer manuellement ou avec une petite grue mobile. Des études avancées doivent être réalisées sur la construction des étages (ou toitures).

- Le drone sera surveillé à tout instant par un membre du projet. Cette personne aura pour rôle de :
 - Préparer le terrain (nettoyage du chantier, préparation des stocks)
 - Préparer le drone (maintenance, gestion des batteries, fixation de bugs).
 - Connecter le drone au modèle BIM.
 - Valider les tâches réalisées par le drone sur le modèle BIM. L'approbation du succès de la tâche permettra au modèle d'être à jour et d'envoyer l'instruction suivante au drone. Un système de scan 3D pour vérifier la bonne exécution de la tâche serait trop cher pour ce projet et trop compliqué à mettre en place.

3.3 Le protocole BIM/Plan d'exécution

3.3.1 Avant-propos

Le protocole BIM est un document reprenant les objectifs, le champ d'action et les pratiques à suivre pour mener à bien la gestion des informations d'un projet de construction. [28] L'objectif de ce document est de décrire le rôle de chacun autour du BIM, de manière à répondre à certaines attentes et ainsi construire la Dron'house décrite dans la section précédente pour juin 2018. Pour rappel, une annexe sur le BIM est disponible à la fin de ce travail pour plus d'informations.

Plus précisément, le protocole a pour but :

- De disposer d'une méthodologie unifiée pour l'encodage des informations.
- D'améliorer la collaboration entre les acteurs.
- D'améliorer la qualité du bâtiment en réduisant le nombre d'erreurs pendant la construction (depuis l'esquisse jusqu'à la fin de la construction).
- D'éviter la sur-modélisation et la reproduction de travaux déjà effectués.
- De décrire et de montrer les avantages du BIM pour ce projet.
- D'évaluer les compétences de chaque acteur à propos du BIM et de les aider à progresser.

Pour atteindre ces objectifs, les partenaires du projet trouveront dans ce protocole :

- Un planning détaillé des tâches à réaliser.
- Les missions de chacun et leurs deadlines.
- Les principales dates d'échéances du projet.
- Comment encoder les informations de façon uniforme.
- Comment les échanges d'informations sont gérés.

Ce protocole est le premier pour construire un bâtiment avec des drones. Dès lors, les informations et indications données dans le document risquent de changer avec l'apport de nouvelles données non-connues actuellement. De plus, ce document n'est pas écrit par les étudiants qui l'utiliseront pour réaliser la suite du projet car nous estimons que c'est important que les bases du projet soient déjà posées dès cette année. Ce protocole a été écrit avec l'aide des documents reçus lors de la formation continue BIM – UCL¹⁷ que nous avons suivie (sources utilisées : [29] [30] [31] [32] [33] [34]).

¹⁷ BIM : conception et gestion intégrées, certificat d'université organisé par l'UCL en 2017

3.3.1 Informations générales

Nom du projet : **The Dron’house**

Logo du projet :  DRONHOUSE

Référence du projet : **UCL_EPL_GC_DRONHOUSE**

Adresse du projet : **Bâtiment Vinci, Place du levant 1, 1348 Louvain la Neuve**

Client : **Pole GC de l’EPL – Monsieur Latteur**

Brève description du projet : **Construction de la première maison « drone compatible » grâce à la collaboration d’étudiants de l’EPL**

Révision	Date	Ecrit par	Approuvé par	Commentaires
0	17-03-30	A. Bruneau A.-S. Branders	P. Latteur S. Goessens	Première version du protocole

Tableau 2 – Révision du protocole

3.3.2 Acteurs du projet et missions

La Dron’house sera le résultat d’une collaboration entre les différents partenaires qui travailleront sur le projet. Afin de coller à la réalité d’un chantier, les rôles de chacun des acteurs seront repris par un professeur, des groupes d’étudiants et des techniciens de laboratoire. Chaque poste va être brièvement décrit dans cette partie pour que tous les intervenants comprennent le rôle et l’importance de chacun.

Les acteurs du projet sont :

- Un responsable projet & BIM
- Un architecte
- Un ingénieur en construction
- Un spécialiste drone
- Des fournisseurs

3.3.2.1 Le responsable projet & BIM

Monsieur P. Latteur et Monsieur S. Goessens auront pour rôle de représenter le maître d’ouvrage et d’effectuer le travail du responsable BIM du projet. Ils sont à l’origine du projet qui est maintenant en développement depuis 3 ans et seront donc en mesure d’orienter la réalisation de celui-ci.

Ces fonctions leur sont confiées ensemble pour simplifier l’organisation du projet, même si Monsieur P. Latteur sera principalement le responsable de projet et Monsieur S. Goessens le responsable du BIM, suite à la formation qu’il a effectuée¹⁸.

3.3.2.2 L’architecte

L’architecte sera représenté par un binôme composé d’un ingénieur en construction et d’un ingénieur architecte. Ils auront pour rôle principal de dessiner la Dron’house et de vérifier la compatibilité avec

¹⁸ BIM : conception et gestion intégrées, certificat d’université organisé par l’UCL en 2017

les drones lors de la conception. Pendant la construction, ils devront visiter le chantier régulièrement pour s'assurer de la conformité de la construction et vérifier la qualité obtenue.

3.3.2.3 L'ingénieur des constructions

Des étudiants en ingénierie civile des constructions auront un double poste. Ils devront développer un nouveau système pour construire la toiture (probablement similaire à un système poutres-claveaux) et s'occuper de la gestion du chantier.

3.3.2.4 Le spécialiste drone

Voici un métier spécifique qui n'existe pas dans le monde de la construction actuelle mais qui pourrait être comparé au travail d'un ingénieur méthode. Son objectif est de « terminer » le développement du drone pour que celui-ci puisse se déplacer automatiquement avec des coordonnées GPS en recevant les indications depuis un ordinateur. Il serait utile également de développer une interface sur ordinateur pour communiquer entre le modèle 3D et le drone. Ce travail devrait idéalement être réalisé par des étudiants en ingénierie électromécanique et informatique.

3.3.2.5 Les fournisseurs

Le pôle GC de l'EPL essaie de créer un partenariat avec un fabricant de matériaux pour produire les blocs nécessaires à la réalisation de la Dron'house. Si ce partenariat n'aboutit pas, l'ensemble des éléments nécessaires devrait être produit dans les laboratoires du pôle GC. Les techniciens de laboratoire auraient pour missions d'aider les étudiants à confectionner l'ensemble des blocs nécessaires et porteraient l'étiquette de fournisseur.

3.3.2.6 Liste de contact

Afin de simplifier les échanges, voici un tableau récapitulatif des personnes qui travailleront sur le projet, ainsi que leurs coordonnées.

Rôle	Prénom	Nom	Numéro de GSM	Email
Responsable(s) projet & BIM	Pierre Sébastien	Latteur Goessens		Pierre.latteur@uclouvain.be Sebastien.goessens@uclouvain.be
Architecte(s)				
Ingénieur(s) des constructions				
Spécialiste(s) Drone				
Fournisseur(s)				

Tableau 3 – Coordonnées des membres du projet

3.3.3 Missions du projet et détermination du niveau de BIM requis

La construction de la Dron'house va être le résultat visible du projet. Cependant, elle ne peut pas être réalisée si l'automatisation du drone n'est pas fonctionnelle. Pour cela, le projet a été divisé en deux grandes parties :

- Le développement du drone
- La conception et la construction de la Dron'house

Les principales missions à réaliser pour chaque partie ont été déterminées et sont retranscrites dans deux tableaux séparés. Chaque activité est reliée à un responsable pour laquelle un partenaire a un rôle d'aide ou de vérification. Le tableau permet également d'y trouver le livrable attendu pour la mission, sa contribution au BIM, sa deadline et une explication plus détaillée.

La contribution au BIM de chaque activité décrite dans cette section ainsi que les informations reliées au modèle BIM, détaillées dans la section 3.3.3.3 « Informations nécessaires dans le modèle BIM » et les interactions entre les partenaires de la section 3.3.3.4 « Interaction de chaque partenaire avec le modèle BIM », vont permettre de déterminer le niveau de BIM requis pour le projet. Il est essentiel de définir ce niveau afin que la méthodologie soit adaptée aux besoins du projet.

Pour faciliter les dénominations dans les tableaux, des diminutifs ont été accordés à chaque intervenant :

- Responsable Projet & BIM : **PM** (Project Manager)
- Architecte : **AR**
- Ingénieur des constructions : **GC** (Genie Civil)
- Spécialiste drone : **DS** (Drone Specialist)
- Fournisseurs : **SP** (Supplier)

3.3.3.1 Développement du drone

DEVELOPPEMENT DU DRONE						
Mission	Responsable	Aide / vérificateur	Livrables	Contribution BIM	Deadline / période	Remarques
Connexion entre le drone et l'ordinateur	DS	GC	Software + expérimentations	Moyenne	03/11/2017	Le DS doit établir, probablement au moyen d'une interface, une connexion entre le modèle 3D sur Revit et le drone. GC peut aider grâce à ses connaissances du logiciel Revit (Dynamo).
Transformation des coordonnées	GC	DS	Algorithme	Moyenne	03/11/2017	Le modèle 3D crée ses propres coordonnées. Il est nécessaire de faire une connexion entre les coordonnées du laboratoire et celles du modèle.
Mouvements du drone par l'utilisation de coordonnées GPS	DS	PM	Software + expérimentations	Faible	01/12/2017	Terminer le développement commencé en 2016 par des ingénieurs industriels électromécaniciens et le PM.
Automatisation des mouvements du drone avec les coordonnées GPS	DS	/	Software + expérimentations	Faible	15/12/2017	Le drone doit être en mesure de se déplacer et de saisir des objets automatiquement à partir d'instructions envoyées depuis l'ordinateur.
Développement de la trajectoire du drone	DS	AR	Algorithme	Haute	02/02/2018	DS doit développer un algorithme pour calculer les trajectoires idéales du drone. Il serait intéressant que cet algorithme prenne en compte l'état actuel d'avancement du projet et des éléments déjà construits. AR aidera DS en lui fournissant des modèles 3D avec des obstacles provisoires.
Supervision des tests pour améliorer les vols	DS	GC	Amélioration des algorithmes et softwares	Moyenne	Toute l'année	Analyse des trajectoires lors de la réalisation de la Dron'house pour améliorer les programmes.

Tableau 4 – Missions pour le développement du drone

3.3.3.2 Conception et construction de la Dron'house

La Dron'house						
Mission	Responsable	Aide / vérificateur	Livrables	Contribution BIM	Deadline / période	Remarques
Conception du modèle 3D de la Dron'house	AR	GC	Modèles 3D sur Revit (Architecte, Stabilité, Drone compatible)	Haute	03/11/2017	AR réalise la maquette 3D originale que GC utilise pour vérifier la stabilité (LOD 200). Ensuite AR transforme la maison en une maquette drone compatible (LOD 350).
Détermination des informations requises par le drone pour construire la Dron'house	GC	ALL	Liste d'informations	Haute	03/11/2017	Détermination des informations requises par le drone pour construire la Dron'house (mouvements et coordonnées nécessaires, obstacle sur le chantier, stocks, etc.)
Développement de la toiture (Système poutrain - claveaux par ex.)	GC	AR	2D – 3D Revit (Développement facile sur Solid-Works)	Haute	02/02/2018	Il est nécessaire de développer un système de toiture drone compatible. AR peut aider GC à développer un nouveau principe.
Gestion du chantier	GC	AR & PM	Planning © + Modèle 3D + Excel ©	Moyenne	Toute l'année	GC s'occupera de la gestion du chantier et de l'intervention des autres acteurs. Un planning sera réalisé par GC. Une gestion du budget est également requise.
Gestion des stocks	SP	GC	BIM model	Haute	Toute l'année	SP s'occupe de la production des éléments de construction et de la gestion des stocks sur le chantier et sur le modèle BIM.
Analyse	GC	ALL	Rapport	Haute	29/06/2018	A la fin du projet, une analyse doit être effectuée sur l'ensemble du projet pour comprendre exactement ce qui a fonctionné ou pas. Conclusion plus générale sur l'utilisation des drones dans la construction.

Tableau 5 – Missions pour la construction de la Dron'house

3.3.3.3 Informations nécessaires dans le modèle BIM

Le tableau suivant reprend une liste d'informations nécessaires dans le modèle pour que celui-ci soit utile aux autres partenaires. Chaque information doit être ajoutée par un utilisateur et vérifiée par un autre. Une date limite pour l'ajout de l'information est requise car elle est nécessaire aux autres membres pour avancer dans leurs missions.

INFORMATIONS DANS LE MODELE BIM					
Informations dans le modèle	Responsable	Vérifié par	Requis pas	Date limite	Explications
Planning provisoire	PM	ALL	ALL	01/09/2017	Le planning présent dans ce protocole devra être vérifié par tous les participants au début du projet. Il devra être mis à jour mensuellement par le PM.
Description des éléments de construction (paramètres : longueur, largeur, hauteur, constitution)	GC	AR	SP	06/10/2017	Les blocs utilisés pour la construction de la maison devront être définis rapidement afin de commencer leur production et permettre à l'architecte de modéliser la maison en "drone compatible".
Dimensions de la maison	AR	PM	GC	03/11/2017	GC a besoin de connaître les dimensions de la maison pour préparer le terrain du chantier.
Conception de la maison et de son environnement	AR	GC	DS	03/11/2017	Permettre d'encoder la zone de vol du drone.
Position et orientation des éléments	AR	GC	DS	02/02/2018	Ces informations permettent de préparer les trajectoires des drones. Celles-ci devraient être automatisées par un algorithme, mais il faut pouvoir réaliser des tests avant.
Position du stock	AR	GC	DS	02/02/2018	
Etat du stock	SP	GC	DS	/	Information utile pour que le drone sache quel élément prendre et que GC et SP sachent quand il est nécessaire de réapprovisionner le stock.

Tableau 6 – Récapitulatif des informations nécessaires dans le modèle BIM

3.3.3.4 Interaction de chaque partenaire avec le modèle BIM

Les figures suivantes (Figure 27 et Figure 28) permettent de comprendre rapidement l'interaction de chaque acteur avec le modèle BIM pendant la phase de conception et la phase de construction du projet. Chaque acteur apporte sa pierre à l'édifice en fonction de l'avancement de celui-ci (les numéros représentent l'ordre des actions).

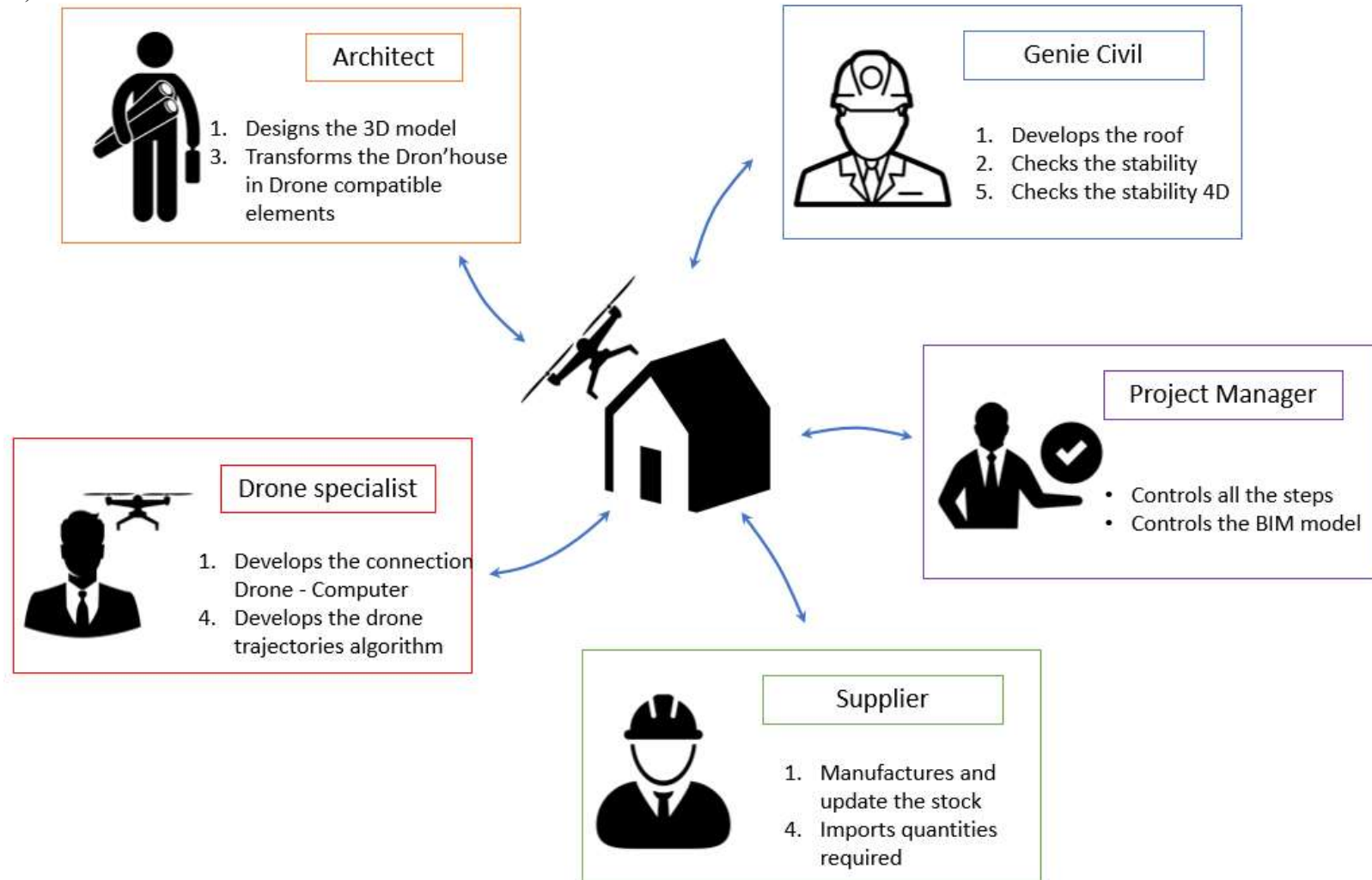


Figure 27 – Contribution et utilisation du modèle BIM pendant la conception

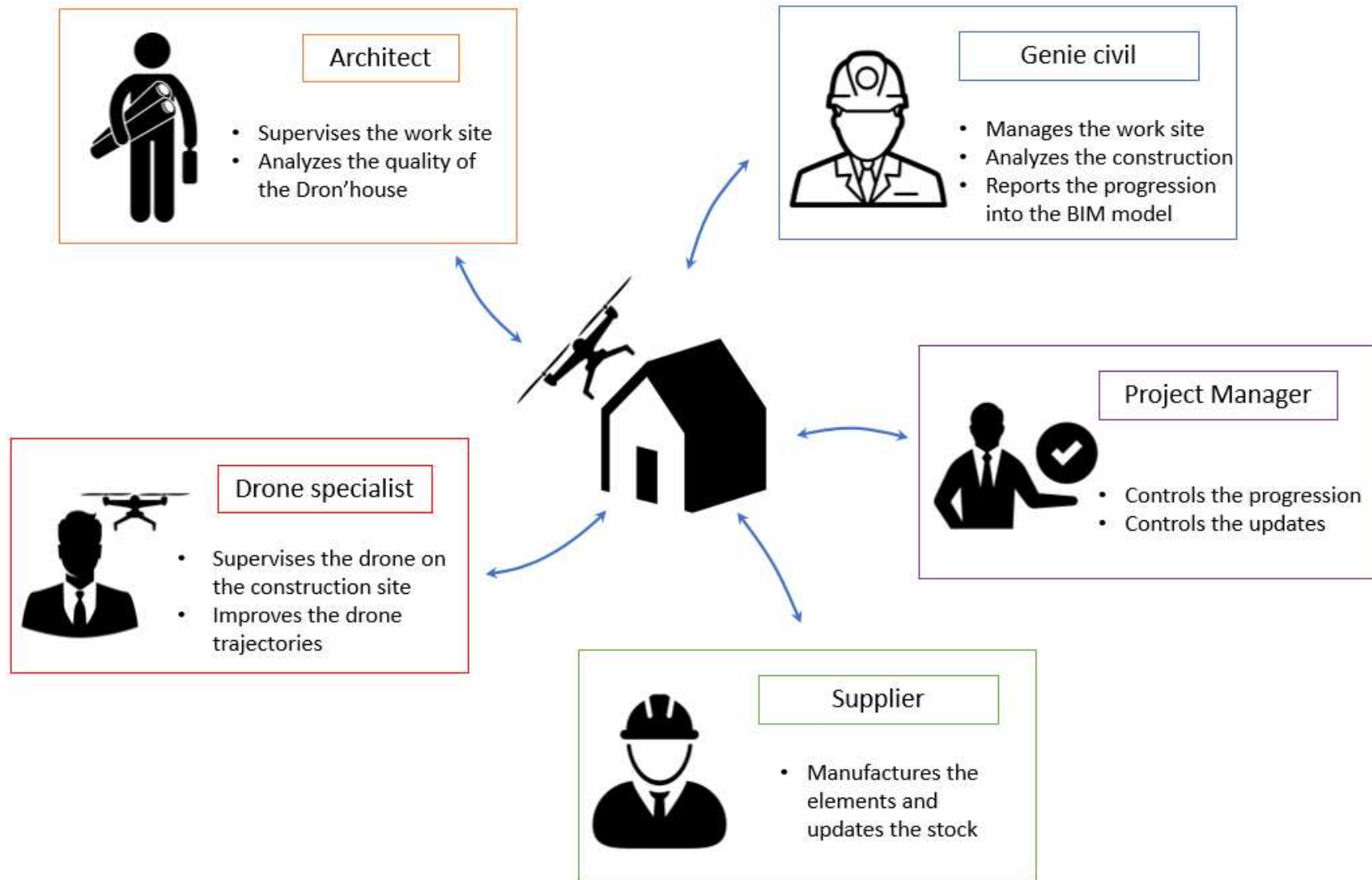


Figure 28 – Utilisation et mise à jour du modèle BIM pendant la construction

3.3.3.5 Niveau de BIM requis

Afin que le projet puisse aboutir, il est essentiel que tous les acteurs travaillent activement sur les deux parties du projet. Si la méthode BIM est indispensable pour que la conception et la construction de la Dron'house soient optimales, elle a beaucoup moins de sens pour le développement du drone.

Sur la partie « conception et construction de la drone house » du projet, un BIM de niveau 2 va être nécessaire. Pour atteindre ce niveau de BIM, il est essentiel de créer un partenariat en utilisant un protocole BIM qui permettra de créer une collaboration active entre les acteurs. Chaque partenaire travaillera sur son propre modèle mais celui-ci sera partagé sur une plateforme en ligne afin de superposer les maquettes et voir les interactions. La plupart des échanges seront réalisés sur la plateforme ou sur un « forum » lié à celle-ci.

La suite de ce protocole va développer les missions de chaque acteur et les règles à suivre pour mettre en place le BIM de niveau 2 requis pour le bon fonctionnement du projet.

3.3.4 Structuration de la maquette

Dès le début du projet, il est essentiel de définir les contraintes permettant la cohérence des modèles utilisés, ainsi que la définition des livrables.

3.3.4.1 Modélisation

La maquette originale sera développée par l'architecte. Celle-ci sera la référence du projet et sera mise à jour régulièrement en fonction de l'avancement du projet et des améliorations effectuées par les autres partenaires.

3.3.4.2 Système de coordonnées

Un système de coordonnées uniques doit être défini au début du projet par tous les participants. Par la suite, l'origine de ce système devra également être définie dans le laboratoire où la Dron'house sera construite. Celui-ci sera la référence pour tous les modèles 3D qui seront liés au cours du projet dans les plateformes d'échanges.

3.3.4.3 Softwares

Les étudiants ingénieurs architectes et ingénieurs des constructions utilisent le logiciel **Revit**© pour modéliser des ouvrages en 3D pour leurs cours à l'EPL. Afin de faciliter les échanges, il serait utile que tous les acteurs du projet utilisent ce logiciel. S'il est probable que d'autres applications soient nécessaires pour contrôler le drone, il serait intéressant de pouvoir les lier à Dynamo, qui est un logiciel de programmation rattaché à **Revit**©. Le format d'échange des maquettes sera donc un fichier **Revit**© (voir le chapitre 3.3.5.2 : Plateforme d'échanges).

3.3.4.4 Unités utilisées

Les unités utilisées sont celles du système international :

- Longueur : m
- Périmètre : m
- Niveau : m
- Surface : m²
- Volume : m³
- Masse volumique : kg/m³
- Température : °C
- Angle : degrés

3.3.4.5 Système de classification

Pour utiliser l'entièreté des capacités du logiciel Revit©, il est indispensable que tout le monde utilise le même système de classification des objets. Le système de classification classique de Revit© est « OmniClass™¹⁹ » et sera utilisé dans ce projet.

3.3.4.6 LOD (Level Of Development)

Les niveaux de développement sont déterminés en fonction de l'avancement du projet et sont le résultat de deux paramètres : le niveau de détail (visuel) et le niveau d'information (données). Dans ce projet, deux niveaux différents seront demandés :

- La conception initiale de l'architecte sera réalisée en LOD 200, ce qui permettra au modèle BIM d'être composé des murs et de la toiture. Les informations encodées serviront à cerner les limites et contraintes du projet.
- Lors de la transformation de la Dron'house en maison « drone compatible », il sera nécessaire d'avoir une plus grande quantité d'informations et une meilleure interface graphique. Un LOD 350 devrait être suffisant pour répondre à ces exigences.

3.3.5 Procédures de collaboration

L'utilisation de procédures de collaboration permet aux partenaires de garantir la cohérence et le respect des objectifs du projet.

3.3.5.1 Système d'archivage²⁰

L'utilisation d'un système commun de numérotation des fichiers informatiques est très utile pour bien comprendre les fichiers de chaque partenaire.

Proj-Dis-Seq-NR.xxx

Avec :

- **Proj** = DRONHOUSE
- **Dis** = discipline (PM : Responsable de projet, AR : Architecture, GC : Ingénieur des constructions, DS : Spécialiste Drone, SP : Fournisseur)
- **Seq** = numéro séquentiel (3chiffres)
- **NR** = numéro de révision
- **xxx** = suffixe définissant le format de fichier (généralisé par le logiciel de modélisation)

Le fichier d'assemblage final sera nommé par le responsable BIM.

3.3.5.2 Plateforme d'échanges

Il est important de définir les plateformes d'échanges dès le début du projet :

- **A360** : L'utilisation de Revit© pour la modélisation des maquettes BIM facilitera les échanges entre les acteurs. Ces échanges seront effectués grâce à la plateforme d'**Autodesk A 360**. L'accès est gratuit pour les étudiants et professeurs de l'UCL.
- **Office 365** : Ce protocole est disponible en fichier Word et peut être modifié grâce à la plateforme **Office 365** si nécessaire. Des modifications peuvent être effectuées directement sur

¹⁹ OmniClass™: C'est un système de classification pour l'industrie de la construction. C'est un outil qui fournit une structure de classification pour une base de données électronique [41]

²⁰ Format de classification réalisé sur l'exemple du protocole BIM UCL [31]

le document ou par l'ajout de commentaires. L'accès est gratuit pour les étudiants et professeurs de l'UCL.

- Les échanges informels se feront avec des plateformes aux choix des étudiants. Une plateforme comme Facebook© n'est pas conseillée car elle n'est pas adaptée pour échanger sur des sujets variés avec tous les acteurs.

3.3.6 Missions détaillées de chaque partenaire

Dans les sections 3.3.3.1 et 3.3, les deux parties du projet ont été rapidement détaillées. Afin que chaque acteur connaisse exactement son rôle et celui des autres, voici des tableaux qui reprennent toutes leurs missions individuelles. Presque chacune d'entre elles est réalisée ou vérifiée par un autre acteur afin de s'assurer de la justesse du travail. Pour chaque activité, des dates limites sont définies car les autres acteurs en ont besoin pour réaliser leurs propres missions.

3.3.6.1 Responsable projet et BIM

RESPONSABLE PROJET & BIM				
Missions	Aidé par / Vérifié par	Date de début	Date de fin	Description
Maître d'ouvrage	/	04/09/2017	08/06/2018	Il aura pour rôle de valider les grands principes que les acteurs du projet vont proposer.
Coordinateur	/	04/09/2017	08/06/2018	PM est en charge de la coordination des acteurs pour s'assurer de l'avancement du projet.
Coordinateur BIM	PM	04/09/2017	08/06/2018	PM doit s'occuper de mettre en place le BIM dans le projet grâce au protocole BIM défini ici.
Echange d'informations	ALL	04/09/2017	06/10/2017	Mise en place de la plateforme BIM pour réaliser les échanges entre les acteurs du projet. Une convention d'échanges devra être réalisée pour que tous les acteurs sachent comment nommer et gérer les fichiers.
Vérifier les échanges BIM	ALL	04/09/2017	08/06/2018	Vérification afin que les échanges soient réalisés comme la procédure le demande.
Estimation des coûts du projet	GC	04/09/2017	02/02/2018	Détermination des coûts de la Dron'house et des éléments nécessaires pour le drone.
Aide BIM	ALL	04/09/2017	08/06/2018	Le BIM est une méthodologie de travail non maîtrisée par les étudiants. PM aura pour rôle de les aider.
Sauvegardes		09/10/2017	08/06/2018	Toutes les semaines, le PM réalisera une sauvegarde du modèle BIM en cas de crash de la maquette.
Compatibilité BIM	ALL	04/09/2017	08/06/2018	Même si tous les acteurs font attention à ce que leur travail soit drone compatible, celui-ci devra être contrôlé de temps en temps par le PM.

Tableau 7 – Missions à réaliser par le responsable projet & BIM

3.3.6.2 Architecte

ARCHITECTE				
Missions	Vérfié par/Aidé par	Début	Fin	Remarques
Imaginer la Dron'house	GC	04/09/2017	06/10/2017	AR doit dessiner une maison en pensant à la compatibilité drone.
Conception du modèle 3D de la Dron'house et de son environnement	GC	09/10/2017	03/11/2017	AR doit concevoir le modèle 3D de la maison mais également son environnement. L'environnement sera composé des limites du laboratoire et des obstacles présents sur le chantier.
Détermination des stocks	GC - DS	09/10/2017	03/11/2017	Un brainstorming sera nécessaire pour déterminer la gestion des stocks qui sera différente des chantiers actuels. Le stock devra être « drone compatible ».
Transformer le modèle pour l'adapter au drone	GC	06/11/2017	02/02/2018	En utilisant le software Dyna'drone, AR doit transformer la maison en éléments drone compatible.
Surveiller le chantier	PM	05/02/2018	08/06/2018	AR doit s'assurer de la qualité et de l'exactitude des réalisations sur le chantier.

Tableau 8 – Missions à réaliser par l'architecte

3.3.6.3 Ingénieur des constructions

GENIE CIVIL				
Missions	Aidé par / Vérifié par	Date de début	Date de fin	Description
Détermination des informations requises par le drone	ALL	04/09/2017	03/11/2017	Le drone aura besoin de beaucoup d'informations pour réaliser son travail (position, système de préhension, puissances nécessaires en charge et à vide, etc.)
Développement d'un plancher drone compatible + essais en laboratoire	AR	04/09/2017	02/02/2018	Le projet ne définit pas obligatoirement un toit plat, mais ce sera probablement le plus facile à mettre en œuvre.
Calcul de la stabilité du bâtiment	AR	06/11/2017	01/12/2017	GC s'occupera de vérifier la stabilité globale du bâtiment, de la position des poutres, des éventuels porte-à-faux, etc.
Transformation des coordonnées	DS	04/09/2017	03/11/2017	Le modèle 3D crée ses propres coordonnées. Il est nécessaire de faire une connexion entre les coordonnées du laboratoire et celles du modèle.
Préparation du chantier	PM	06/11/2017	02/02/2018	Le lieu de construction nécessitera peut-être quelques ajustements pour accueillir la Dron'house.
Gestion du chantier	PM	05/02/2018	08/06/2018	GC est responsable du bon avancement du chantier, il gère tous les intervenants. L'utilisation du modèle BIM sera très importante.
Analyse + Rapport	ALL	05/02/2018	08/06/2018	Tous les mois, l'équipe entière devra réaliser un débriefing sur le projet et l'utilisation du BIM. L'objectif sera d'analyser l'avancement du projet et savoir dans quelle direction continuer. Un rapport avec les conclusions finales sera demandé à la fin du projet.

Tableau 9 – Missions à réaliser par les étudiants ingénieurs en construction

3.3.6.4 Spécialiste Drone

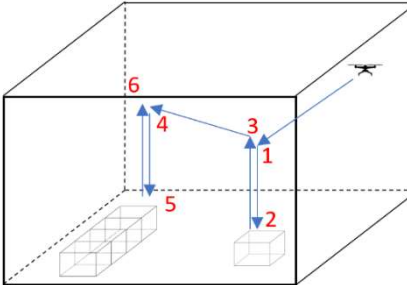
SPECIALISTE DRONE				
Missions	Vérifié par/Aidé par	Début	Fin	Remarques
Mise en place de la communication entre le drone et l'ordinateur	GC	04/09/2017	03/11/2017	Dans un premier temps, l'ordinateur doit être capable d'envoyer les informations au drone. Ensuite, il serait utile que le drone puisse renvoyer des informations à l'ordinateur.
Connexion avec un système GPS + réalisation de trajectoire simple	PM	06/11/2017	01/12/2017	Il est nécessaire de développer une localisation précise du drone dans l'espace et de le déplacer grâce à celle-ci.
Développement d'algorithmes de déplacement pour le drone	AR	04/09/2017	02/02/2018	Développement d'un algorithme de déplacement qui prend en compte l'état d'avancement de la construction. Une trajectoire simplifiée (1 à 6) est représentée par la figure suivante. 
Automatisation du drone	PM	04/12/2017	02/02/2018	Le drone doit être capable de se déplacer et de saisir/déposer un élément automatiquement
Supervision du drone pendant la construction	GC	05/02/2018	08/06/2018	DS doit être sur le chantier pour résoudre des problèmes éventuels du drone et améliorer l'algorithme de déplacement.
Création d'une interface pour contrôler le drone depuis l'ordinateur	ALL	05/02/2018	08/06/2018	GC et PM ont besoin de pouvoir contrôler le drone. Une interface simple sur un ordinateur avec une notice semble obligatoire.

Tableau 10 – Missions à réaliser par le spécialiste drone

3.3.6.5 Fournisseur

FOURNISSEUR				
Missions	Aider par / Vérifier par	Date de début	Date de fin	Description
Mise en place de la sécurité	GC	04/09/2017	06/10/2017	La sécurité est la première chose à mettre en place sur un chantier. Le drone est dangereux et il est important d'être derrière dans une zone sécurisée pendant qu'il travaille. Les techniciens devront s'occuper de mettre en place cette zone de sécurité grâce à leur connaissance des lieux
Production des "dricks"	GC	04/09/2017	02/02/2018	SP est en charge de produire avec GC les "dricks" nécessaires s'il n'y pas de fournisseurs extérieurs
Production des "hourdricks"	GC	05/02/2018	06/04/2018	SP est en charge de produire avec GC les claveaux et poutains nécessaires s'il n'y pas de fournisseurs extérieurs
Gestion des stocks	GC	04/09/2017	06/04/2018	SP est en charge de mettre à jour les stocks dans le modèle BIM aussi bien pour mettre au courant les partenaires que le drone !

Tableau 11 – Missions à réaliser par le fournisseur

3.3.7 Conclusion

Le protocole est un document qui doit être validé par tous les membres du projet. Il est donc nécessaire que chacun appose sa signature afin qu'il s'engage à honorer ses engagements et à tout mettre en œuvre pour le bon déroulement du projet.

	Responsable projet / BIM	Architecte	Génie Civil	Spécialiste drone	Fournisseur
Nom Prénom					
Signature					
Nom Prénom					
Signature					

Tableau 12 – Signature des participants

3.4 Révolution de la construction

Comme expliqué dans la conclusion du chapitre 2, il est temps de changer les méthodes d'industrialisation et arrêter de simplement reprendre les robots utilisés dans les autres secteurs industriels.

Le drone tel qu'il est connu aujourd'hui est une technologie récente et nécessite encore de nombreuses recherches afin de découvrir et repousser ses limites. Les sections précédentes (3.2 & 3.3) développent une stratégie de recherches au sein de l'EPL pour découvrir les limites du drone avec les éléments « drone compatible » conçus. Voici deux propositions d'autres recherches, à mener en parallèle ou à la suite des recherches déjà présentées.

La première possibilité est intégrée au mémoire « Design de la Dron'house & Recherche d'un nouveau concept de construction robotisé » exposé précédemment. Ce mémoire devant être réalisé idéalement par un étudiant ingénieur architecte et un étudiant ingénieur des constructions, permettrait de ne pas se focaliser uniquement sur du design ou de la technique pure. Afin de rester dans la suite des recherches à l'EPL, la seule contrainte serait l'utilisation des drones pour la construction. Il serait essentiel de leur laisser une liberté complète dans leurs recherches et ainsi leur permettre de s'égarer dans des idées qui paraîtraient peut-être absurdes au premier abord. Ils pourraient par exemple, s'ils le désirent, associer le drone à un autre robot ou bien le modifier (rajouter des fonctionnalités au drone) afin d'élargir les possibilités de ces robots. L'étude d'un nouveau composant de construction serait aussi une possibilité. Doit-on toujours se baser sur des éléments déjà existants (garder la forme générale d'une brique, par exemple) et les adapter aux robots ? Il ne faut pas hésiter à tout remettre en question car l'élément « robot compatible » idéal est peut-être en fait quelque chose de complètement autre qu'un bloc de béton pré-coulé... En bref, ils auraient carte blanche sur leur projet.

La seconde proposition serait de lancer un projet au sein des classes d'innovation²¹. Celles-ci sont ouvertes à un public très large permettant d'obtenir un panel d'étudiants d'horizons différents. Le sujet serait très ouvert : **Quelle industrialisation pour diminuer les délais de construction et améliorer la qualité des ouvrages ?** Aucune solution technique n'est obligatoirement attendue afin de ne pas limiter l'imagination des participants. Pour les aider mais pas non plus les canaliser, il serait intéressant d'organiser un partenariat avec des grandes sociétés Belges de la construction « pratiquant » l'innovation. Ce sujet n'est en aucun cas dédié aux ingénieurs ou plus spécifiquement aux ingénieurs en construction, puisque la multidisciplinarité est la base de l'innovation et de la découverte. C'est d'ailleurs peut-être même des personnes qui ne connaissent pas du tout les pratiques actuelles du monde de la construction qui, grâce à leur recul sur le sujet, parviendraient à en identifier les failles.

²¹ Les «classes d'innovation» font partie du programme de l'EPL comme cours à option pour les étudiants de deuxième master, toutes sections confondues. Le principe est de proposer une méthode d'enseignement différente, basée sur l'apprentissage actif pour favoriser la créativité des élèves et les familiariser avec les approches innovantes développées ces dernières années.

Chapitre 4

Outil de traduction d'un modèle Revit en éléments « drone compatible »

SOMMAIRE

4.1 Introduction

4.2 User Guide

4.3 Routines créées pour Dyna'drone

4.5 Création de maisons en Dricks-LP-60 grâce à Dyna'drone

4.5 Dans le futur



4 Outil de traduction d'un modèle Revit en éléments « drone compatible »

4.1 Introduction

Depuis quelques années, le monde de la construction vogue sur le courant du Building Information Modeling/Managing. Les modèles BIM permettent la visualisation des projets en 3D sur la maquette numérique mais ils sont surtout une base de données de l'information et des liens qui existent entre toutes ces données. Toute l'information peut ainsi être centralisée au sein d'un même fichier.

Les drones ne sont rien d'autre que des robots, leur automatisation nécessite donc des instructions provenant d'une base de données. Au vu du courant actuel du BIM dans la construction, il semble logique que ces informations doivent provenir directement du modèle BIM. En effet, un des gros challenges dans les projets de construction aujourd'hui est d'arrêter la duplication des données d'un même projet.

C'est pourquoi *Dyna'drone for Revit* a été créé. Cet outil est créé sur Dynamo, une extension de programmation pour le logiciel Revit. Dans le processus de construction (voir Figure 31), ce programme s'insère juste après la construction du modèle BIM. Il va effectuer la traduction du modèle 3D créé sur Revit en éléments *drone compatibles*, accompagnés de leurs caractéristiques principales afin de pouvoir créer les instructions pour le drone. Toute l'information reste donc au sein du modèle. Le terme *Dyna'drone* est une composition de « Dynamo » et « drone ».

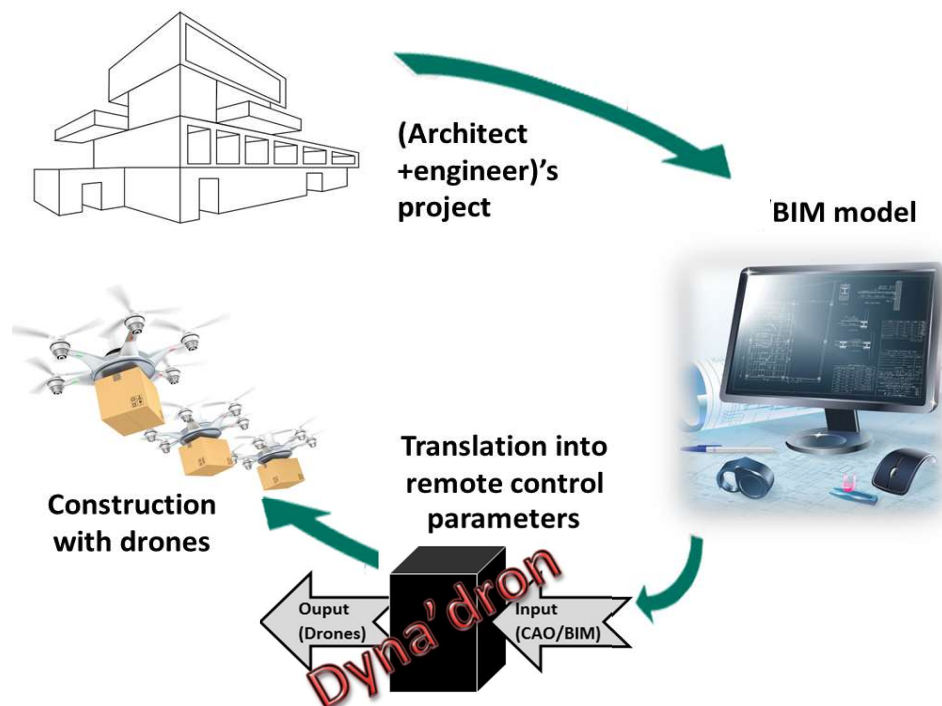


Figure 29 – Processus de construction "drone compatible" [43]

Cet outil est un élément indispensable pour les étudiants qui réaliseront le projet présenté à la section 3 : « Des projets pour innover ». Les différents éléments *drone compatible* développés et choisis pour la réalisation de la *Dron'house* pourront être chargés dans le programme. La modélisation BIM de la maison pourra ainsi être efficacement traduite avec ces éléments, sur le logiciel Revit.

Une autre étude a déjà été réalisée sur ce sujet en 2016 par Milan Renier [35], qui a développé un outil pour modéliser des structures de petites tailles et les traduire en instructions *drone compatible*. Dans ce travail, le bâtiment à construire doit être modélisé sur cette interface et il est donc déjà créé selon les règles spécifiques des éléments *drone compatible*. D'une part, cela limite l'utilisateur dans la confection de son bâtiment à construire (utilisation de blocs de dimensions particulières, murs droits et de longueur multiple d'un certain facteur, ouvertures placées à des endroits spécifiques, etc.) et, d'autre part, cela implique que l'information ne peut être enregistrée de manière aussi riche que dans un modèle BIM « traditionnel » qui contient également tous les autres éléments de construction (pas seulement le gros œuvre).

La différence est donc que *Dyna'drone* permet de créer son modèle de manière traditionnelle (c'est à dire sur un logiciel déjà connu et utilisé quotidiennement, sans règles de confection spécifiques, etc.) et c'est seulement après cela que le projet sera traduit en éléments *drone compatible*. C'est donc la traduction en modèle *drone compatible* qui s'adapte au projet et non le projet qui s'adapte à la traduction *drone compatible*.

De plus, *Dyna'drone* s'utilise avec Revit, qui est un des programmes BIM les plus utilisés en Belgique. Cela permet donc de laisser les gens travailler sur un environnement qu'ils connaissent et l'information sera ainsi centralisée de la même manière qu'avant, sans avoir besoin de changer de logiciel.

Cette section présente quatre parties principales. Tout d'abord, le guide d'utilisateur²² (*user guide*) destiné à être fourni avec *Dyna'drone* se trouve à la section 4.2. Ensuite, la section 4.3 présente les différentes routines utilisées pour créer le programme. La section 4.4 propose un exemple d'utilisation de *Dyna'drone* avec des éléments *drone compatible* développés à l'EPL. Finalement, les différentes pistes d'extension et d'amélioration de cet outil sont présentées dans la section 4.5.

²² Dans un souci d'accessibilité et de diffusion future du programme, le guide d'utilisateur est rédigé en anglais

4.2 User Guide



Figure 30 – Logo of Dyna'drone

4.2.1 What is Dyna'drone for Revit ?

Dyna'drone is a tool to translate a 3D Revit model into *drone compatible* elements. It runs on Dynamo, the programming extension for Autodesk Revit. The aim of this script is to get all the information needed by your drone(s) for the construction of the building on the basis of a “traditional” 3D model. The Revit model doesn't need to be transferred to another software, so that all the data stays in the initial 3D model.

Dyna'drone offers 3 main functionalities:

- 1) Slicing of the walls: Translation of the model's walls into drone compatible elements. It divides the chosen walls into bricks and lintels of your choice.
- 2) Placement of a floor system: Placement of “poutrains” and “claveaux” in order to create a floor system on the top of the walls of your choice
- 3) Additional features: Some more useful functions, such as weight's check for the placed elements.

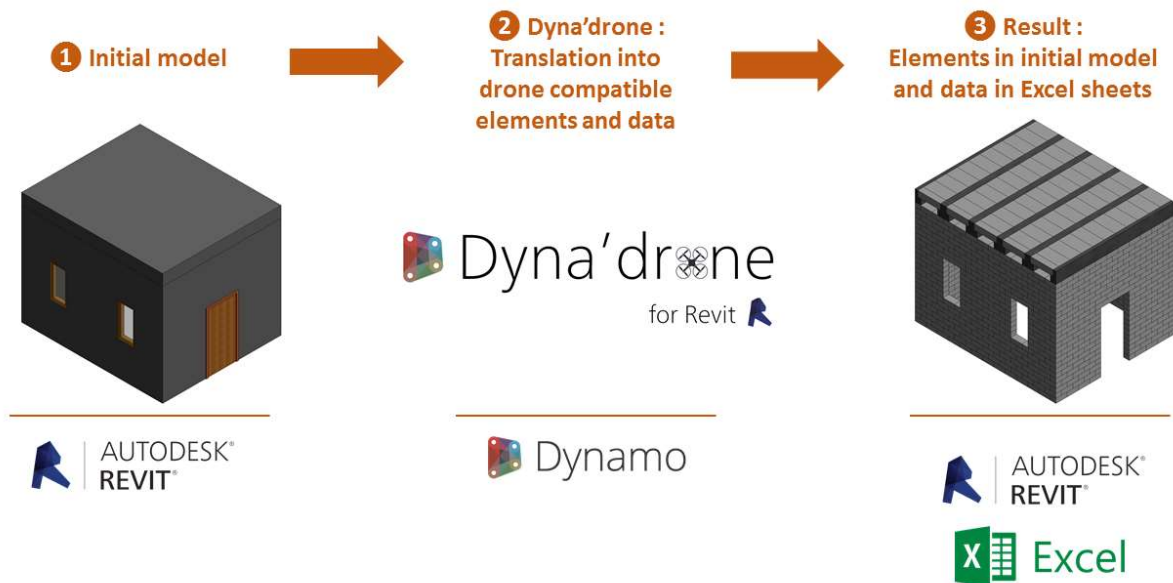


Figure 31 – Dyna'drone

4.2.2 Installation of Dynamo and the packages

To download Dynamo, go on <http://dynamobim.org/download/> [36] and select “Download” (next to the red arrow on Figure 32).

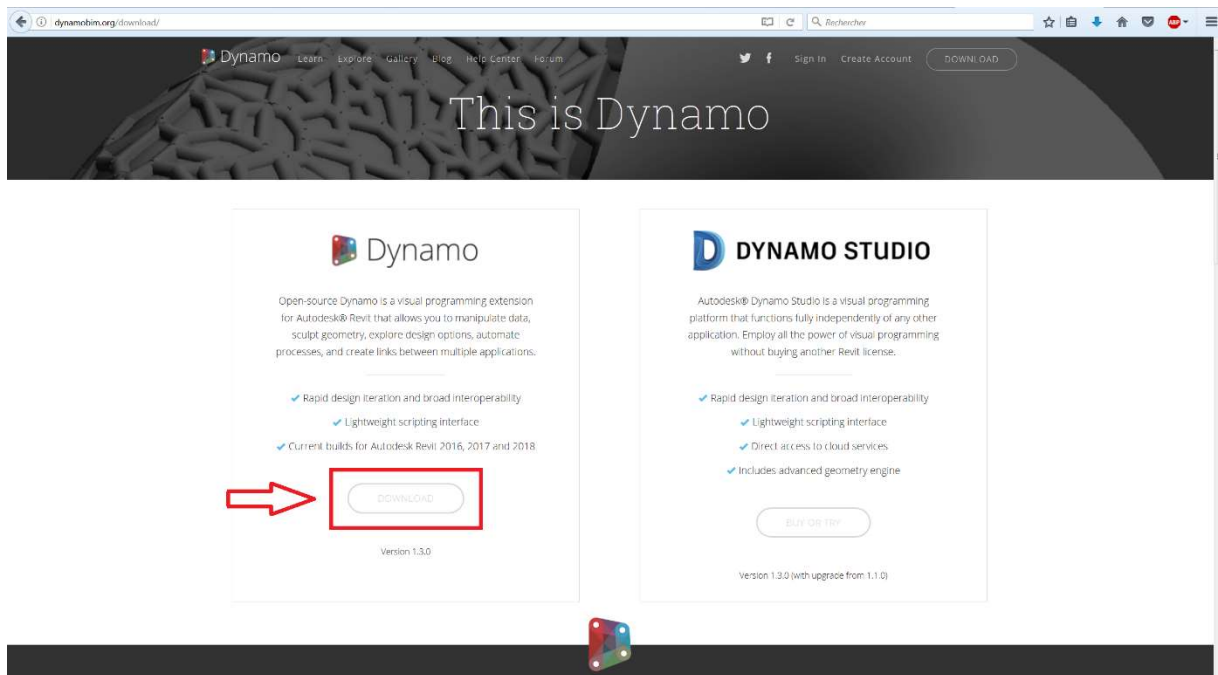


Figure 32 – How to download Dynamo for Revit

Then go to the directory of the downloaded installer and run the executable file. Dynamo is now installed on your computer. You can open it directly or via Revit. We will open it on Revit, so the program can interact with the current opened Revit project.

Go to the Revit menu, chose the “Manage” tab and you will find the icon of Dynamo (see on Figure 33).

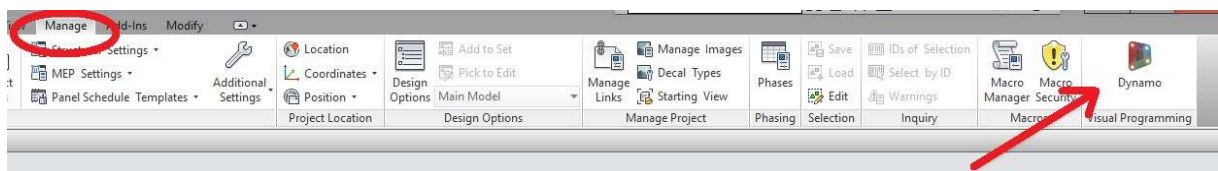


Figure 33 – Opening Dynamo from Revit

The installation of two packages is required to use *Dyna'drone*. In order to install them, go to “Packages”, “Search for a Package” in the menu of the Dynamo’s home page (see Figure 34).

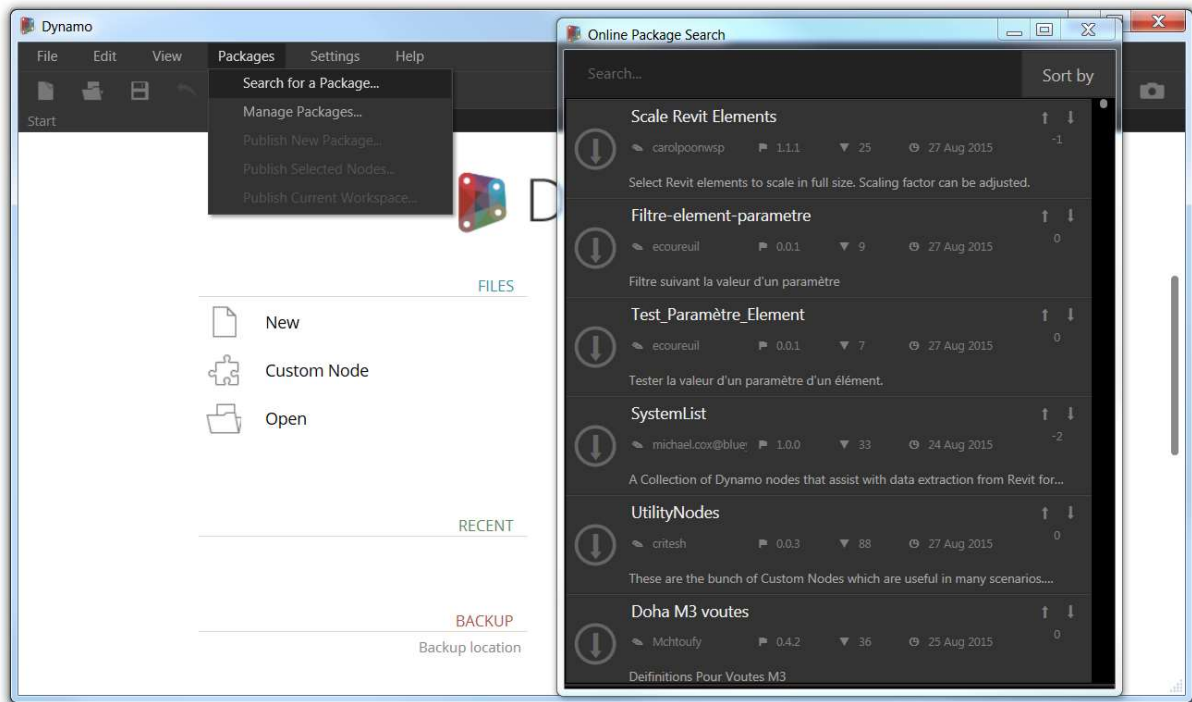


Figure 34 – Add packages on Dynamo²³

Then search the following packages with the “Online Package Search” and install them:

- Clockwork
- Springs

To open *Dyna'drone*, just click on “Open” on the home page of Dynamo and search for the “dynadrone.dyn” file on your computer. Double click on it, you are now ready to use *Dyna'drone* !

If you want to know more about Dynamo, you can visit <http://dynamoprimer.com/> [37].

4.2.3 Structure of the program

The structure of *Dyna'drone* in Dynamo is presented below in Figure 35.

²³ Source : <http://dynamobim.org/issues/extend-dynamo-with-packages/>

Outil de traduction d'un modèle Revit en éléments « drone compatible »

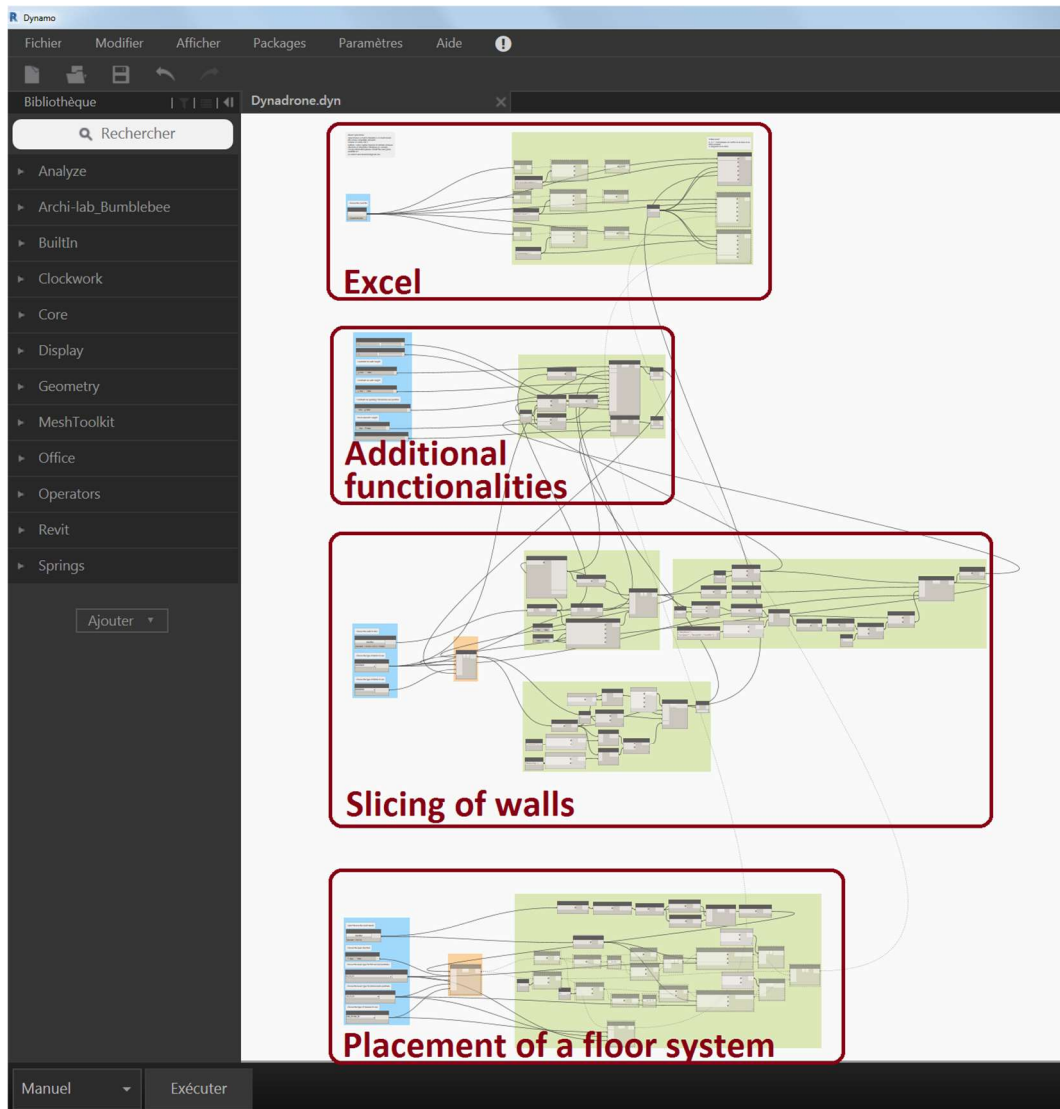


Figure 35 – Structure of Dyna'drone

The groups of blocks with a blue background are the inputs you have to fill in or check/uncheck.

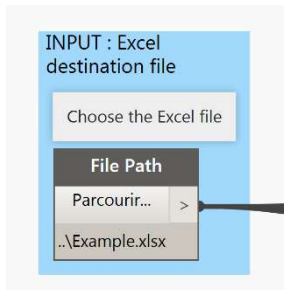
The groups with an orange background are the functionalities you may activate or deactivate. If you want to use a functionality, just right click on the node and select “unfreeze”. If you don't want to use it anymore, disable the node with a right click and select “freeze”.

Other nodes present in the program but not mentioned were necessary for the implementation of *Dyna'drone*. They must not be modified.

4.2.4 Excel destination file

After running the program, all the data extracted from the newly placed drone compatible elements are saved in an Excel file. This allows you to manipulate the required data as you wish, in order to create and transmit tasks to your drone in the right format.

4.2.4.1 Inputs



1) File Path

First, create and give a name to a blank Excel sheet. Then, select it from the “File path” node as shown on Figure 36. This Excel file will contain all the data outputted in the “Slicing of walls” and “Placement of a floor system” parts of the program.

Figure 36 – Input for the Excel destination file

4.2.5 Slicing of walls

This first main functionality of *Dyna'drone* is to divide (« to slice ») the selected walls into small drone compatible elements. Running the program will place bricks layer by layer and let holes with a lintel above for the openings. Figure 37 shows example of result you get for different configurations of walls or different types of bricks.

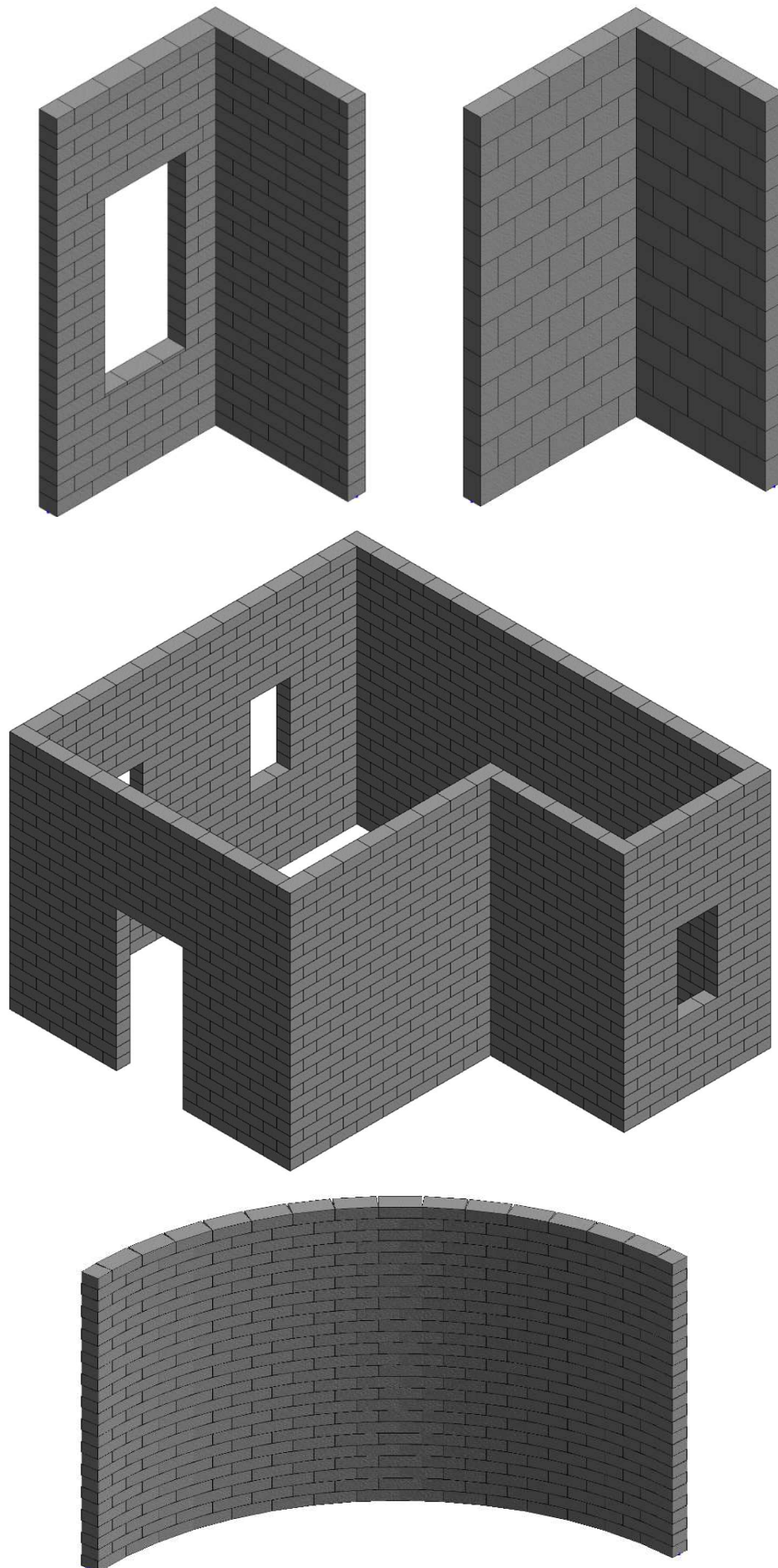


Figure 37 – Examples of result for the slicing function

To run this code, you have to defreeze the “Slice” node (Figure 38) in Dynamo and to enter the inputs presented below in this section. To freeze or defreeze the node, just right click on it and select “Freeze/Unfreeze”.

Note that *Dyna'drone* doesn't support openings in curved walls.

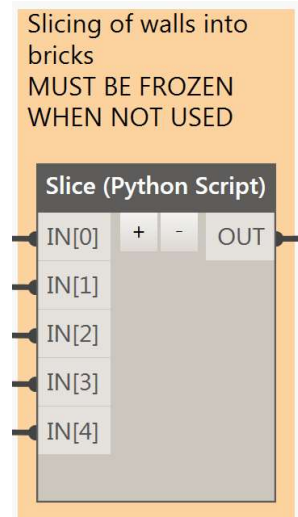


Figure 38 – "Slice" node

4.2.5.1 Inputs

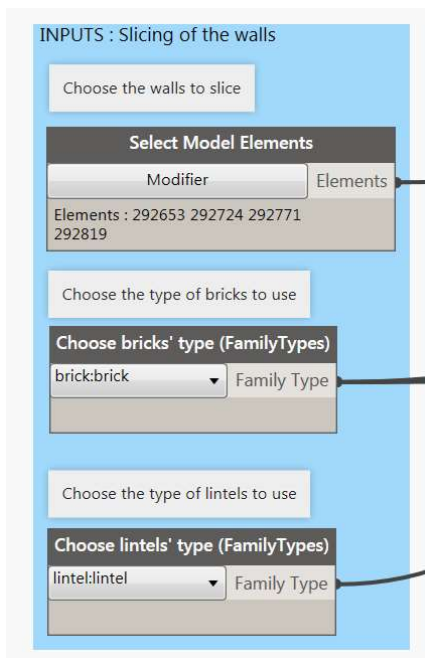


Figure 39 – Inputs for the slicing

1) Choose the walls to slice

Click on the “Select” button on the input node. Then go to the Revit model to select all the walls you want to slice. As multiple elements can be selected, the selection has to be done by dragging the mouse over the walls while holding down the left-hand button.

2) Choose the type of bricks

First make sure that the bricks' family is loaded into the Revit project. Then simply select the FamilyType of the bricks in the drop-down menu on the input node.

3) Choose the type of lintels

First make sure that the lintels' family is loaded into the Revit project. Then simply select the FamilyType of the lintels in the drop-down menu on the input node.

Parameters of the input families

To be used in *Dyna'drone*, the families of elements must contain specific parameters that are described here for each family.

1) Bricks

The different parameters to create in the bricks' family are:

Name	Parameter type	Description
TypeHeight	Length	Height of the body of the brick
TypeLength	Length	Length of the body of the brick
TypeWidth	Length	Width of the body of the brick
Density	Mass density	Density of the brick

Table 1 - Parameters for the brick's family

2) Lintels

The different parameters to create in the lintels' family are :

Name	Parameter type	Description
TypeHeight	Length	Height of the lintel
TypeLength	Length	Length of the lintel
TypeWidth	Length	Width of the lintel
Density	Mass density	Density of the lintel

Table 2 - Parameters for the lintel's family

4.2.5.2 Outputs

All the outputted information will be written in the Excel file you indicated (see section Excel destination file), in the sheet called “Bricks&Lintels”.

Each line of the file contains the information of a single element. All the elements (= all lines) given in the file are sorted in the order they have to be placed by the drone for the construction. In fact, not respecting this order can lead to collision between elements due to the imprecision of the drone or to elements dropped without any support below. The algorithm followed to determine the order of placement is described in the Master Thesis of Milan Renier [35].

Each column contains a different parameter of the element :

Column A : FamilyType

Column B : ID of the element in the Revit Model

Column C : X coordinate of the center of gravity of the element in the Revit Model

Column D : Y coordinate of the center of gravity of the element in the Revit Model

Column E : Z coordinate of the center of gravity of the element in the Revit Model

Column F : Length

Column G : Height

Column H : Angle of the element main axis with the X axis of the model

Column I : Weight in kg

4.2.6 Placement of a floor system

This second main functionality of *Dyna'drone* is to place a “poutains-claveaux” floor system for the Revit selected floor element and in the selected span direction. Figure 40 and Figure 41 show example of result you get for different configuration of floors or different types of *claveaux*.

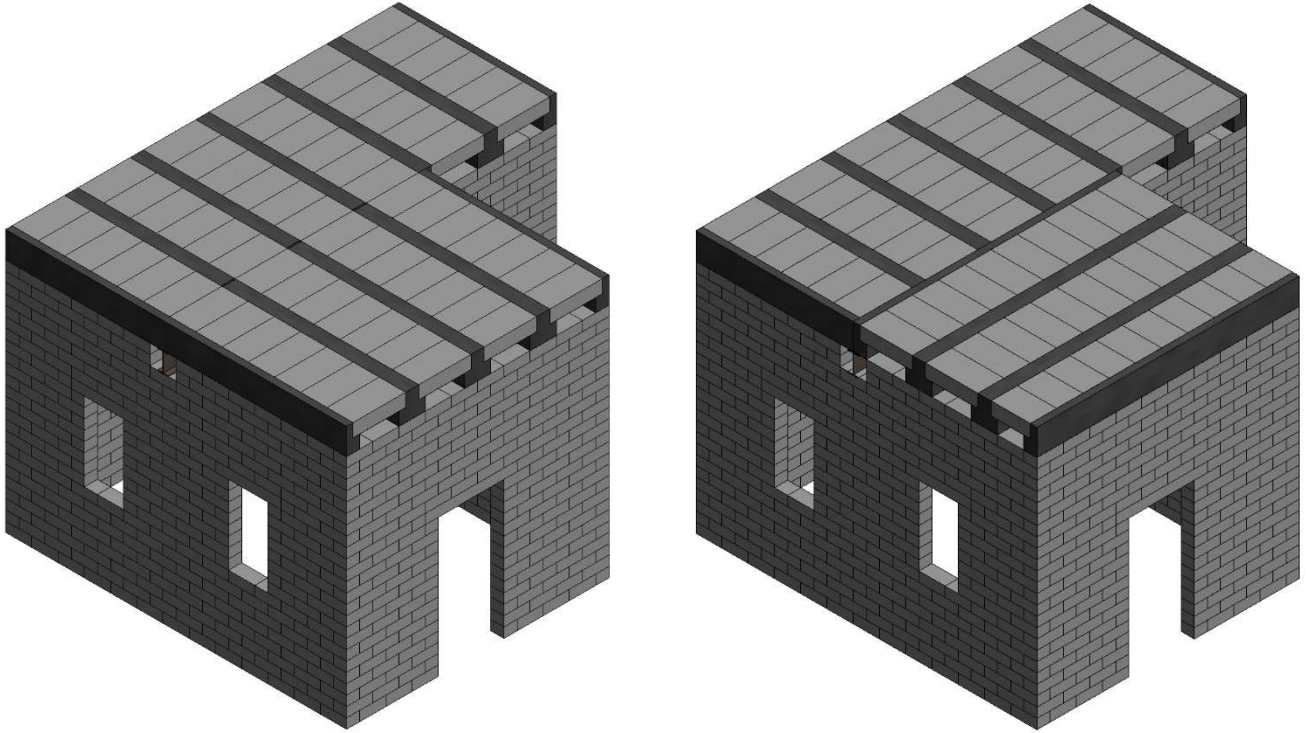


Figure 40 – Example of placement of a floor system with different span directions

The space between the *poutrains* (beams) is calculated with the length of the chosen *claveaux* (slabs). In the case the two last *poutrains* will be too close, the penultimate one will be placed at the equal distance between the previously placed beam and the last one. This is illustrated on Figure 41.

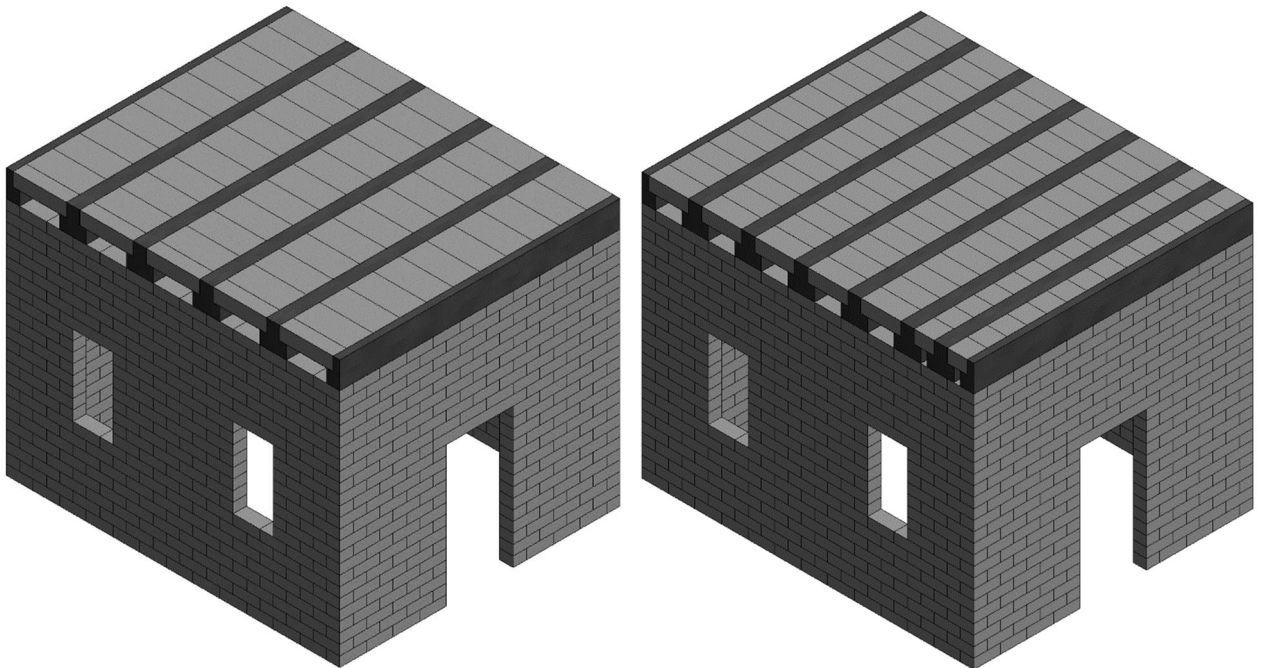


Figure 41 – Example for the placement of a floor system, with different sizes of « claveaux »

Note that *Dyna'drone* doesn't verify if all the placed *poutrains* are supported by a wall or another beam. The addition of intermediate support is at charge of the user.

To run this code, you have to defreeze the "Place poutrains" node (Figure 42) in Dynamo and to enter the inputs presented in this section. To freeze or defreeze the node, just right click on it and select "Freeze/Unfreeze".

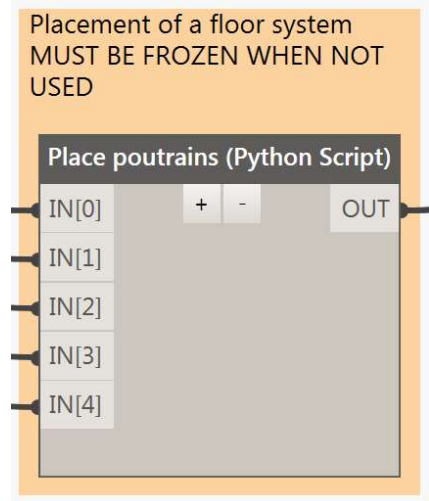


Figure 42 – "Place poutrains" node

4.2.6.1 Inputs

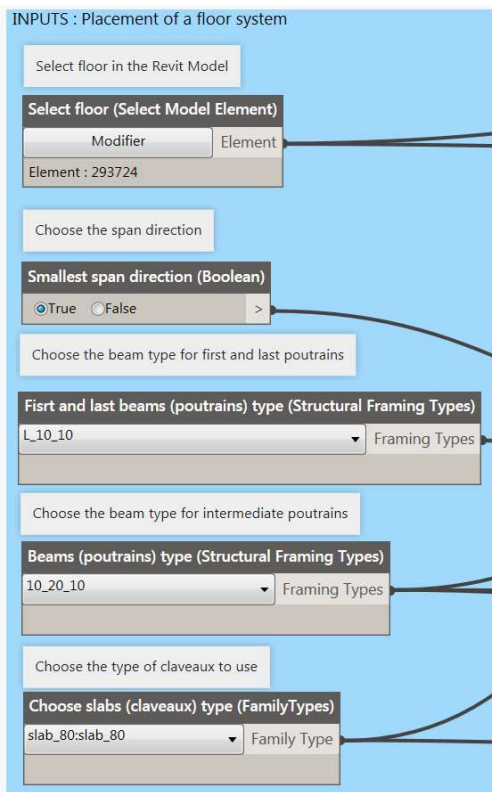


Figure 43 – Inputs for the placement of a floor system

1) Select floor in the Revit Model

Click on the "Select" button on the input node. Then go to the Revit model and select the floor. Note that it must have a rectangle shape and the height of the floor must be the height of the *poutrains*.

2) Choose the span direction

Check True if you want the smallest span direction, False instead.

3) First and last *poutrains*' type

Choose the type of the side *poutrains*. The family must be imported in the Revit Project.

4) Intermediate *poutrains*' type

Choose the type of the other *poutrains*. The family must be imported in the Revit Project.

5) *Claveaux*' type

Choose the type of the *claveaux*. The family must be imported in the Revit Project.

Parameters of the input families

To be used in *Dyna'drone*, the families of elements must contain specific parameters that are described here for each family.

1) Poutrains

The different parameters to create in the *poutrains*' family are:

Name	Parameter type	Description
Seat	Length	Length of the seat of the beam
Base	Length	Length of the base of the beam
Upper width	Length	Width of the upper part of the beam

Table 3 - Parameters for the poutrains' family

2) Claveaux

The different parameters to create in the *claveaux*' family are:

Name	Parameter type	Description
TypeHeight	Length	Height of the slab
TypeLength	Length	Length of the slab
TypeWidth	Length	Width of the slab

Table 4 - Parameters for the claveaux' family

4.2.6.2 Outputs

All the outputted information will be written in the Excel file you selected (see section Excel destination file), in the sheet called "Poutrains" for the *poutrains* and in the sheet called "Claveaux" for the *claveaux*.

Each line of the file contains the information of a single element and each column contains a different parameter of the element :

Poutrains :

Column A : FamilyType

Column B : ID of the element in the Revit Model

Column C : Length

Column D : X coordinate of the starting point of the beam in the Revit Model

Column E : Y coordinate of the starting point of the beam in the Revit Model

Column F : Z coordinate of the starting point of the beam in the Revit Model

Column G : X coordinate of the ending point of the beam in the Revit Model

Column H : Y coordinate of the ending point of the beam in the Revit Model

Column I : Z coordinate of the ending point of the beam in the Revit Model

Claveaux :

Column A : FamilyType

Column B : ID of the element in the Revit Model

Column C : Length

Column D : Width

Column E : X coordinate of the starting point of the slab in the Revit Model

Column F : Y coordinate of the starting point of the slab in the Revit Model

Column G : Z coordinate of the starting point of the slab in the Revit Model

Column H : X coordinate of the ending point of the slab in the Revit Model

Column I : Y coordinate of the ending point of the slab in the Revit Model

Column J : Z coordinate of the ending point of the slab in the Revit Model

4.2.7 Additional features

Some additional features have been developed, in order to give you more information or to check that some constraints imposed by the BIM protocol are respected.

4.2.7.1 Constraint on the walls' length or height

Some of the bricks' types will require to never be shortened. You may be interested in checking that the division of the chosen walls won't require placing cut bricks.

If you want to activate the check, just choose "True" in the corresponding input box (see Figure 44).

The "Dividing factor" (Figure 45) allows more flexibility. For example, if the brick's type you selected can be placed in its entirety or can be divided by two along its length, you can slide to "2" as dividing factor for the length.

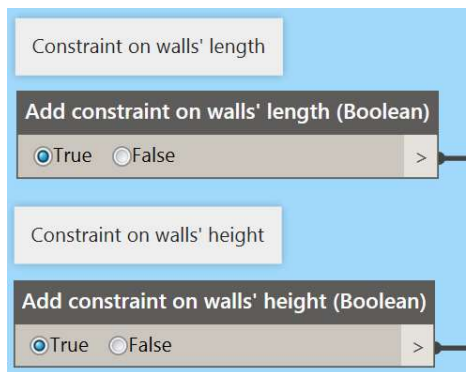


Figure 44 – "Add constraint on wall's length and height" functionalities

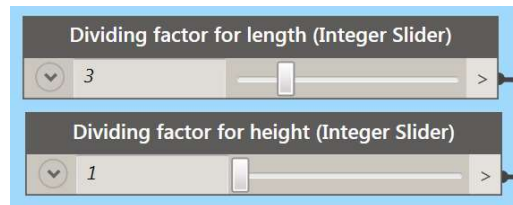


Figure 45 – Dividing factors

If a condition is not respected, the execution will stop and an error message will appear (example on Figure 46).

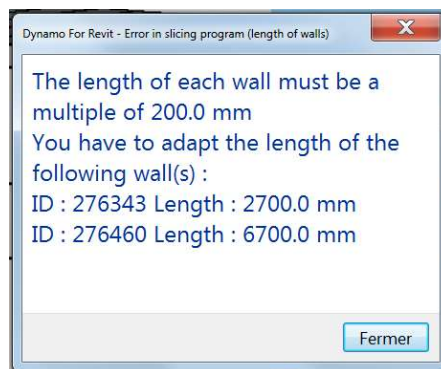


Figure 46 – Example of error message

4.2.7.2 Constraint on the openings' dimensions and position

Following the same idea than the one presented in *Constraint on the walls' length or height*, an opening can be problematic for the bricks, due to its dimensions or position. The option presented on Figure 47 allows you to check if the parameters of the different openings are respecting the bricks' characteristics.

Outil de traduction d'un modèle Revit en éléments « drone compatible »

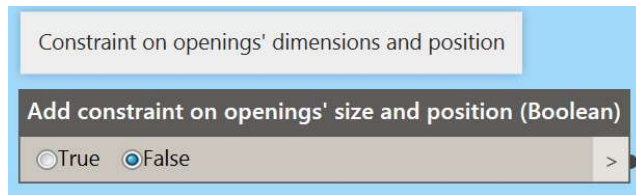


Figure 47 – "Add constraint on openings' size and position" functionality

In case of problem, *Dyna'drone* will also raise an error with the description of the problematic elements.

4.2.7.3 Check of the weight of elements

Weight is an important characteristic to take into account for your *drone compatible* elements. With this functionality, you can rapidly determine if your drone is able to carry all the elements of your model or if some adaptations are necessary.

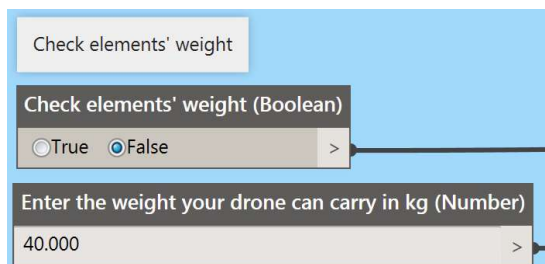


Figure 48 – Check elements' weight

4.3 Routines créées pour *Dyna'drone*

Cette section décrit les routines principales codées pour les deux fonctionnalités principales de *Dyna'drone* : *Slicing* des murs et placement d'un étage. De cette manière, une personne souhaitant modifier ou faire évoluer le programme pourra facilement comprendre la manière dont il est construit.

4.3.1 *Slicing* des murs

Cette partie du programme permet de récupérer des murs du modèle Revit et de les *slicer* (diviser) en briques d'un certain type choisi. Les étapes ci-dessous illustrent le raisonnement suivi pour arriver à l'algorithme final de *slicing*.

Le code de l'algorithme de *slicing* des murs se trouve dans le *node* « Slicing » du programme Dynamo (Figure 49).

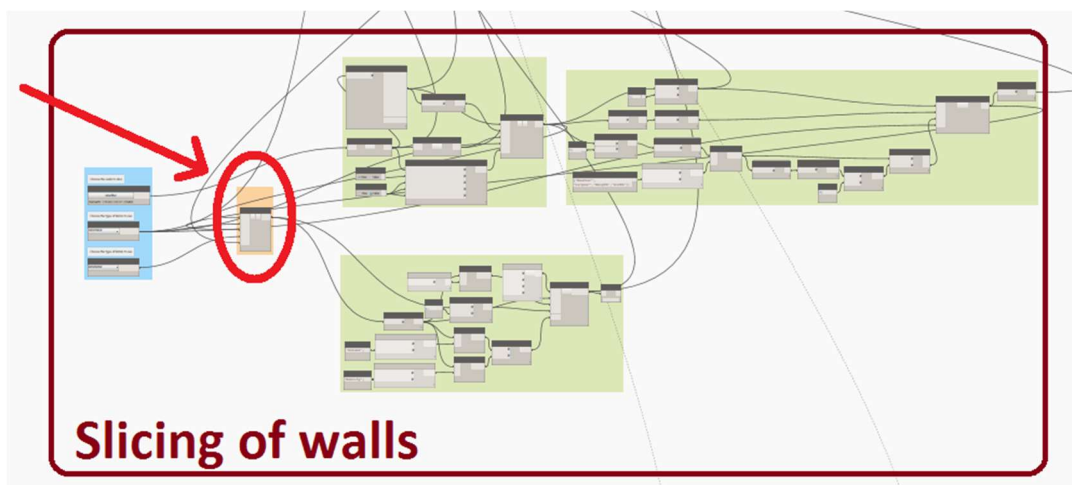


Figure 49 – Position du noeud "Slicing" dans la structure du programme

4.3.1.1 *Slicing* d'un mur simple

La première étape consiste en la division d'un mur simple en briques et la récupération des informations de position et de dimensions de ces briques. Les seules données qu'on va exploiter de l'élément récupéré dans Revit sont la courbe décrivant la base du mur et sa hauteur (Figure 50).

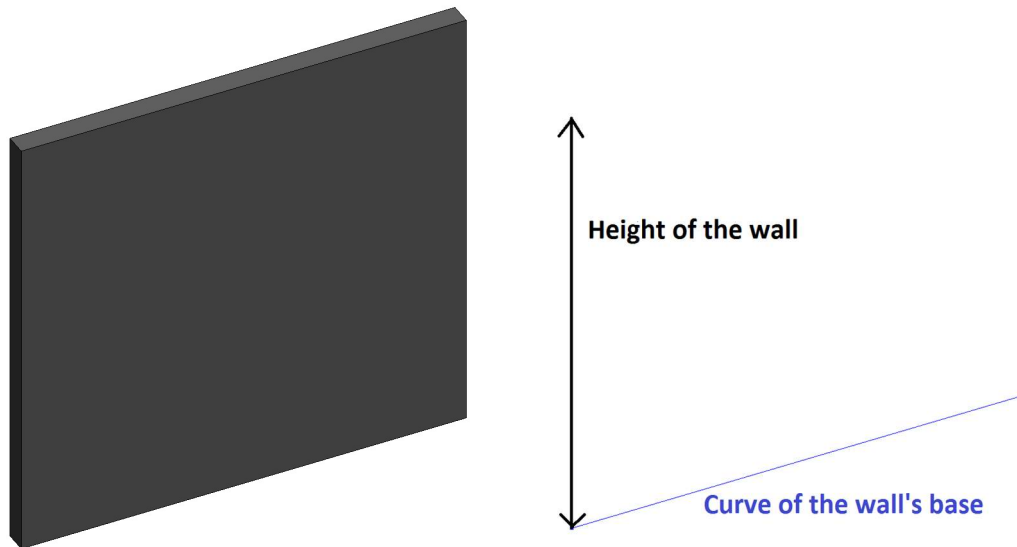


Figure 50 – Exemple d'un mur simple dessiné dans Revit et sa description par sa courbe de base et sa hauteur

Les briques sont ensuite placées les unes après les autres le long de la courbe, couche par couche. Afin de respecter l'alternance des couches de briques dans un mur, celles-ci sont décalées de la longueur d'une demi brique pour une couche sur deux placée. Si nécessaire, la dernière brique placée sur une couche sera raccourcie afin de s'adapter à la longueur du mur. Il en est de même pour la hauteur des briques de la dernière couche, si la hauteur du mur n'est pas proportionnelle à la hauteur des briques. Dans le cas d'un mur courbe, l'espacement entre les briques est adapté de manière à ce que celles-ci ne s'entrecroisent pas (dû à leur rotation les unes par rapport aux autres). L'algorithme suivi est décrit ci-dessous.

#z is the relative placement height for the bricks of the actual layer, x is the relative starting position of the next brick to place along the curve

```

while z < wall_height :
    while x < wall_length :
        if z + brick_height > wall_height :
            we adapt the height of the bricks placed for this layer
        else if x == 0 :
            placement of a half brick if odd layer, entire brick if even layer
        else if wall_length - x < brick_length :
            we adapt the length of the brick
        else :
            placement of a brick
        x increased with the length of the placed brick (+ additional distance to avoid clash in case of curved wall)
    z increased with the height of the placed brick
    
```

Après l'exécution de cet algorithme sur Dynamo, on obtient par exemple le résultat présenté à la Figure 51.

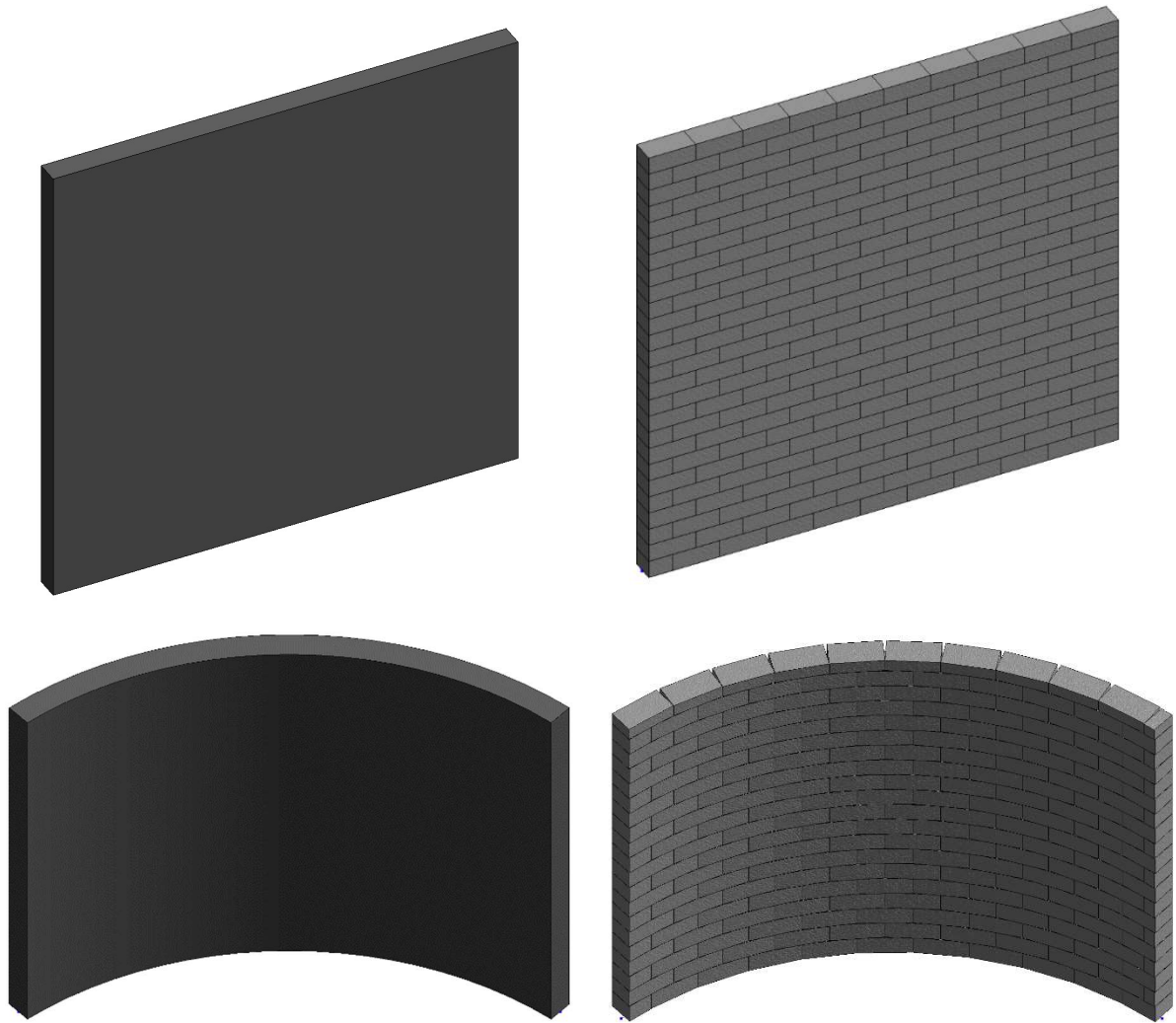


Figure 51 – Exemple du slicing d'un mur simple

4.3.1.2 Tri de plusieurs murs en séquences

Afin de pouvoir traiter des murs multiples, il a fallu développer un algorithme pour créer des séquences de murs adjacents depuis la liste des éléments récupérés dans Revit de manière aléatoire. Les points principaux de cet algorithme sont décrits ci-dessous, suivis par un exemple.

First sorting of the walls' curves

for each curve from the input list:

if curve == first curve:

 creation of a new sequence with the curve and placement in the sequences' list

else:

for each sequence already created:

if start point of the curve == end point of the last wall of the sequence:

 curve added at the end of the sequence

Outil de traduction d'un modèle Revit en éléments « drone compatible »

```
else if end point of the curve == start point of the first wall
of the sequence:
    curve added at the beginning of the sequence
else if start point of the curve == start point of the first
wall of the sequence:
    reversed curve added at the beginning of the sequence
else if end point of the curve == end point of the last wall of
the sequence:
    reversed curve added at the end of the sequence
else:
    creation of a new sequence with the curve and placement
in the sequences' list
```

Combination of adjacent sequences

#The algorithm keeps the same idea of comparing the extreme coordinates but we compare a sequence with another (instead of a curve and a sequence).

Creation of the loopList

#To create the list indicating if a sequence is a closed loop or not, we compare the coordinate of the start point of the first wall of the sequence with the one of the end point of the last wall.

Chaque étape de l'algorithme est illustrée par l'exemple présenté à la Figure 52.

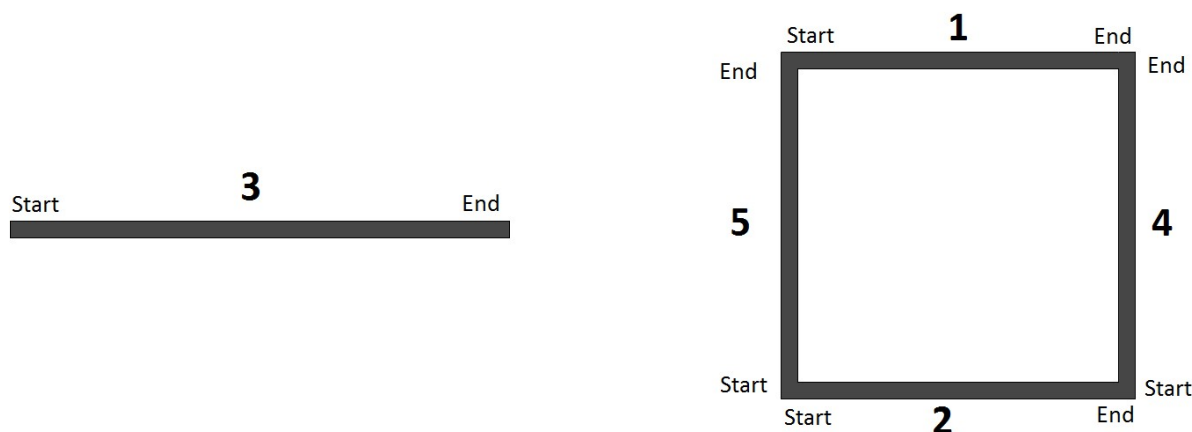


Figure 52 – Illustration de l'algorithme de création de séquences de murs adjacents

Les index de murs surlignés en gris correspondent aux « reversed curves » (courbes inversées).

First sorting of the walls' curves

[1]

[1] [2]

[1] [2] [3]

```
[1, 4] [2] [3]
```

```
[5, 1, 4] [2] [3]
```

```
# Combination of adjacent sequences
```

```
[2, 5, 1, 4] [3]
```

```
# Creation of the loopList
```

```
[loop] [not loop]
```

Le code de l'algorithme de tri de plusieurs murs en séquences se trouve dans le nœud « SortElements » du programme Dynamo (Figure 53).

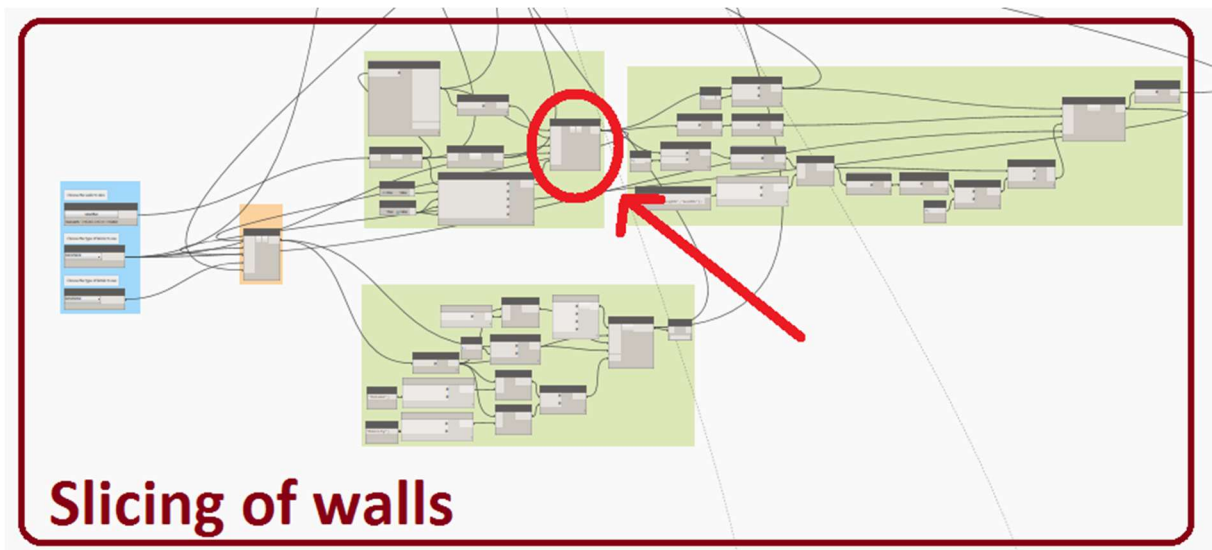


Figure 53 – Position du nœud "SortElements" dans la structure du programme

4.3.1.3 Slicing de séquences de murs

La combinaison des deux étapes précédentes (*slicing* d'un mur simple et tri de plusieurs murs en séquences) va nous permettre d'effectuer le *slicing* de séquences de murs. L'algorithme de *slicing* d'un mur simple a donc été complété afin de traiter des séquences de murs adjacents.

La division en briques va également se faire couche par couche mais pour toute la séquence de murs en une fois. On peut donc être certain qu'aucune brique ne sera déposée dans le vide car le niveau inférieur de tous les murs sera déjà complété avant de passer à la couche supérieure. Cela est illustré à la Figure 54. On remarque également sur la figure que, dans ce cas-ci, la première brique de la couche (celle du *starting corner*) n'a pas encore été placée car celle-ci doit être la dernière de toute la couche à être placée. En effet, l'imprécision du drone nécessite au moins un côté non obstrué dans chaque direction afin de déposer la brique sans la bloquer.

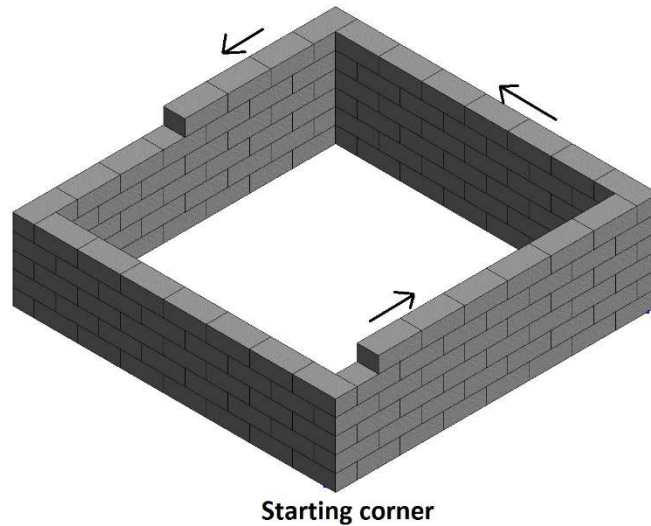


Figure 54 – Slicing d'une séquence de murs adjacents

Afin de gérer l'alternance des briques aux coins formés par des murs adjacents, un nouveau paramètre « prevWall » a été défini. Celui-ci définit le caractère de la dernière brique posée pour le mur précédent. La première brique du mur adjacent pourra donc être placée en conséquence, c'est-à-dire soit au début du mur, soit décalée d'une largeur de brique vers l'autre extrémité du mur (Figure 55 et Figure 56). Un seul paramètre supplémentaire est donc nécessaire au développement de cet algorithme qui se veut simple mais complet afin de traiter tous les différents cas de combinaisons de murs qui peuvent se présenter.

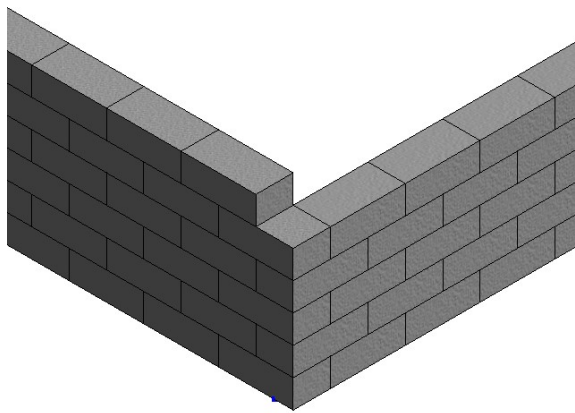


Figure 55 – Cas de mur adjacent où la première brique doit être placée au début du mur

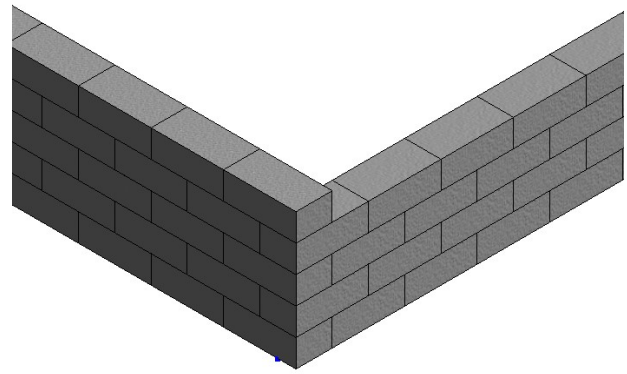


Figure 56 – Cas de mur adjacent où la première brique doit être décalée vers l'autre extrémité du mur

Après l'exécution de cet algorithme sur Dynamo, on obtient par exemple les résultats présentés à la Figure 57.

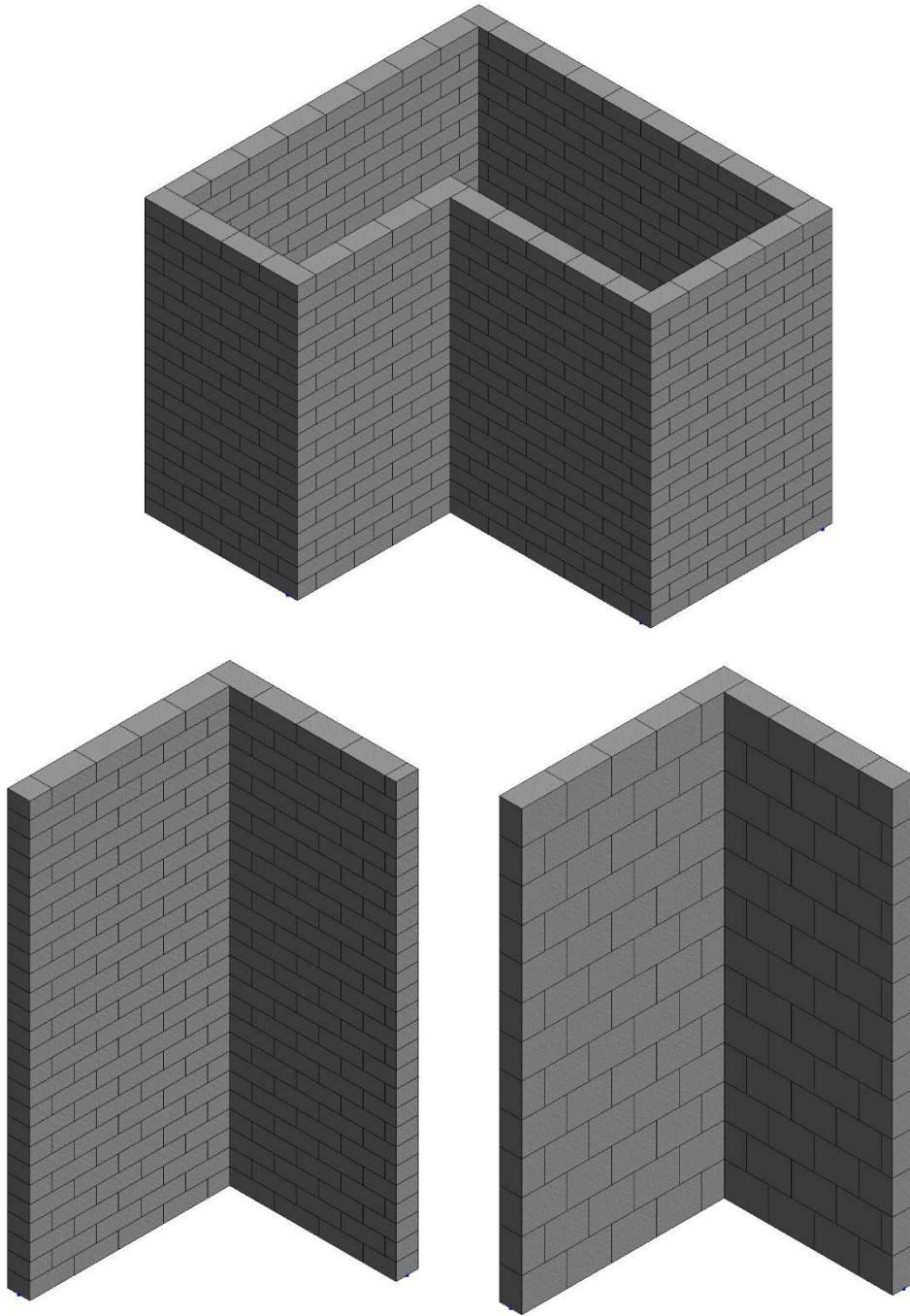


Figure 57 – Slicing de murs adjacents

4.3.1.4 Placement d'ouvertures

Lors du *slicing* des murs, le programme doit déjà savoir où se trouvent les éventuelles ouvertures sur ceux-ci afin d'adapter le placement de ses briques.

Dans Revit, chaque fenêtre ou porte possède un « host », c'est-à-dire le mur hôte sur lequel elle est posée. Il est donc aisé de récupérer et lister les ouvertures présentes sur chaque mur. Dans notre programme, chaque ouverture est décrite par sa position relative sur son mur hôte (Xstart, Xend, Zstart et Zend). Ces listes liées à chaque mur sont ensuite agencées en séquences de listes, correspondant

exactement aux séquences de murs préparées précédemment (voir Tri de plusieurs murs en séquences). Cela est illustré par l'exemple présenté à la Figure 58.

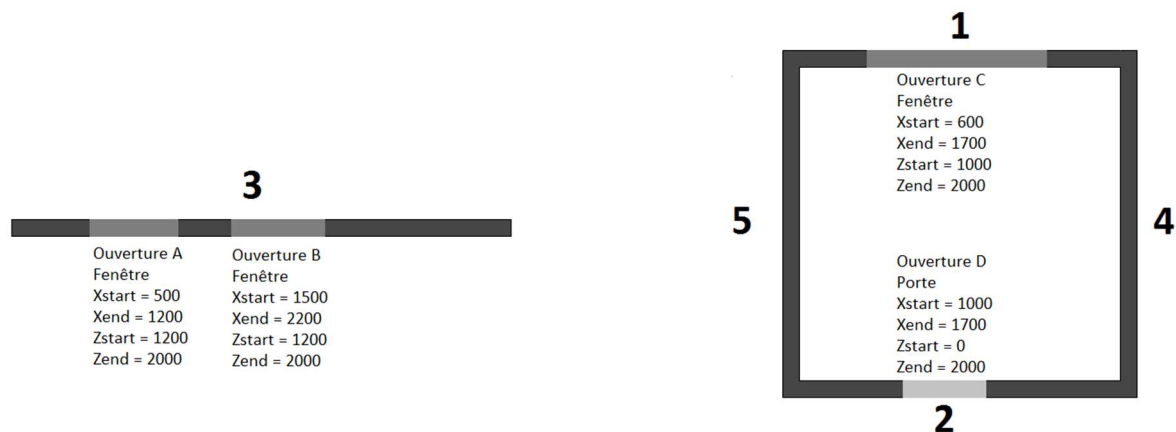


Figure 58 – Exemple de murs multiples avec ouvertures

Pour rappel, les séquences de murs adjacents étaient les suivantes :

[2, 5, 1, 4] [3]

Les séquences d'ouvertures sont alors :

[[D], [], [C], []] [[A, B]]

Autrement dit :

[[[1000,1700,0,2000]], [], [[600,1700,1000,2000]], []] [[[500,1200,1200,2000], [1500,2200,1200,2000]]]

Une partie de code sera donc ajoutée au début de l'algorithme établi précédemment. Cette partie vérifie si on est actuellement dans une ouverture ou non. Si oui, on ne place pas de brique à cet endroit-là afin de créer l'ouverture dans le mur. Si non, on continue dans l'algorithme comme à la section précédente, lorsqu'il n'y avait pas d'ouvertures.

```

while x < wall_length:
    for each opening in the list of openings of the wall:
        if x ≥ Xstart and x < Xend and z ≥ Zstart and Z < Zend:
            bool = True
            Let the place free and increase x
    if !bool:
        Place bricks like usual and increase x
    
```

Après l'exécution de cet algorithme sur Dynamo, on obtient par exemple le résultat présenté à la Figure 59.

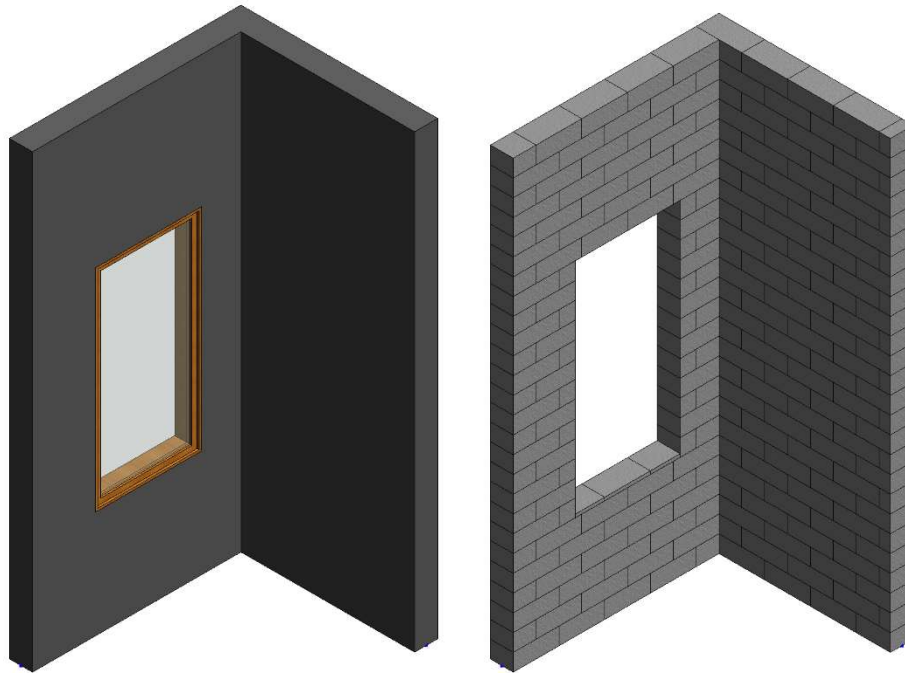


Figure 59 – Exemple de slicing avec une ouverture

4.3.1.5 Placement de linteaux

Haut dessus de chaque ouverture, doit se trouver un linteau. Lorsque les séquences de listes des ouvertures sont créées (voir Placement d'ouvertures), de nouvelles séquences de listes contenant les informations des linteaux correspondants sont créées. L'algorithme utilisé pour placer les linteaux lors du slicing est exactement le même que celui des ouvertures. L'algorithme émis précédemment est donc complété comme ci-dessous.

```

while x < wall_length:
    for each opening in the list of openings of the wall:
        if x ≥ Xstart and x < Xend and z ≥ Zstart and Z < Zend:
            bool = True
            Let the place free and increase x
    for each lintel in the list of lintels of the wall:
        if x ≥ XLstart and x < XLend and z ≥ ZLstart and Z < ZLend:
            bool = True
            Place the lintel and increase x
    if !bool:
        Place bricks as usual and increase x
    
```

Reprenons l'exemple présenté à la Figure 58. Pour rappel, les séquences de murs adjacents et les séquences d'ouvertures étaient les suivantes :

[2, 5, 1, 4] [3]

[[D], [], [C], []] [[A, B]]

Les séquences de linteaux seront donc les suivantes :

[[lintel_D], [], [lintel_C], []] [[lintel_A, lintel_B]]

Après l'exécution de cet algorithme sur Dynamo, on obtient par exemple le résultat présenté à la Figure 60.

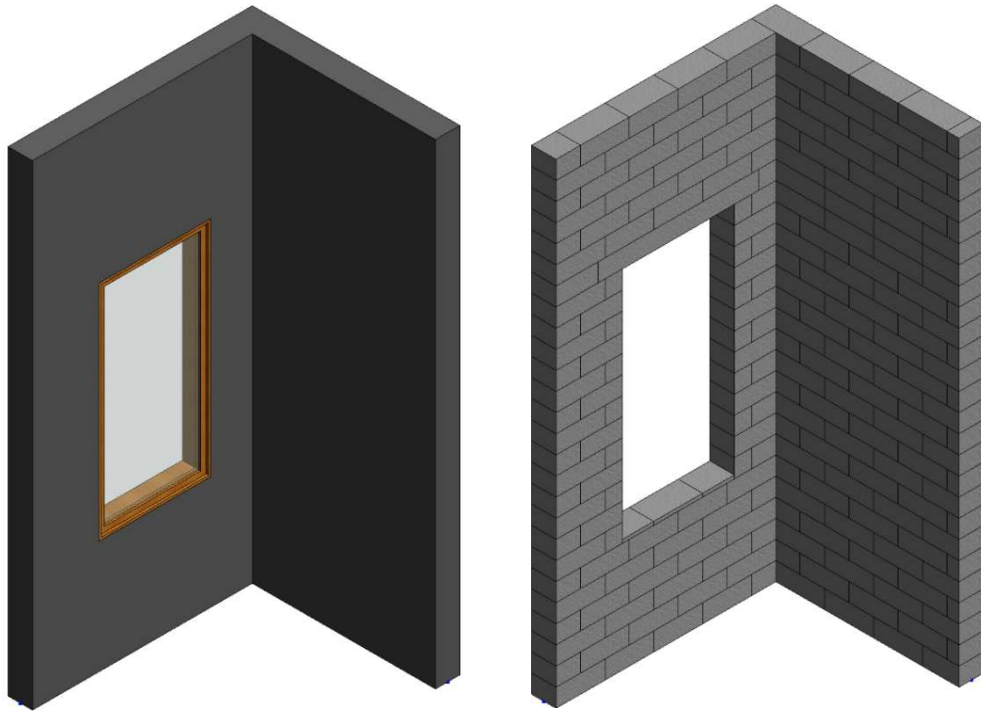


Figure 60 – Exemple de slicing avec une ouverture et un linteau

4.3.2 Placement d'un étage

Cette partie du programme permet de récupérer un sol du modèle Revit et de créer un système de « poutres-claveaux » correspondant à celui-ci. Cela se fait en deux étapes : le placement de tous les poutres dans un premier temps et le placement de tous claveaux ensuite.

4.3.2.1 Placement de poutrains

Le code de la routine de placement des poutrains se trouve dans le nœud « Place poutrains » du programme Dynamo (Figure 61).

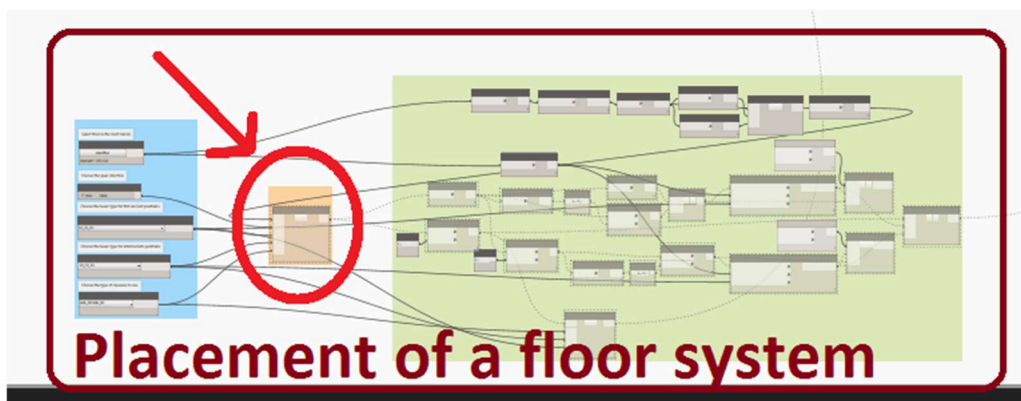


Figure 61 – Position du nœud "Place poutrains" dans la structure du programme

La première partie de l'algorithme va récupérer le sol (*Floor*) passé en argument afin de déterminer le niveau auquel il est associé et les droites constituant son périmètre. En fonction de la longueur de ces droites et du choix de l'utilisateur pour le sens de portée des poutrains, les deux droites perpendiculaires aux futures petites poutres sont sélectionnées (en rouge sur les Figure 63 et Figure 62). C'est à partir d'elles et de la longueur de claveaux choisis que le placement des poutrains peut commencer.

Chaque poutrain sera placé selon une droite, qui correspond au milieu de la largeur de la base de celui-ci. L'espacement entre les droites des futurs poutrains (= *spacing*) est donc défini comme la longueur du type de claveau choisi, à laquelle on ajoute deux fois la demi largeur supérieure des poutrains adjacents.

Ensuite, la série de droites espacées de *spacing* va être créée. Ces droites sont donc parallèles les unes aux autres et leur point de départ et d'arrivée se trouvent respectivement sur chacune des droites définies au début.

Tout cela est illustré sur les Figure 62 et Figure 63.

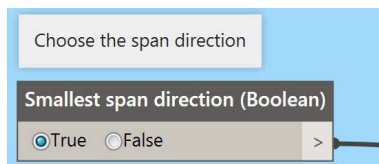
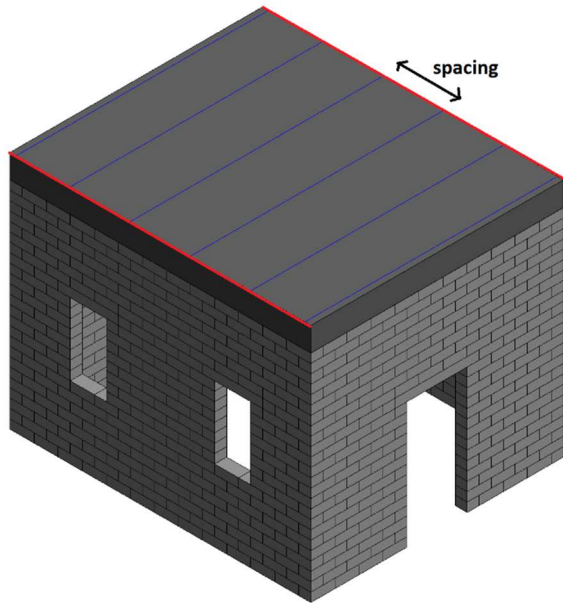


Figure 62 – Emplacement des futurs poutrains dans le cas du choix du plus petit sens de portée

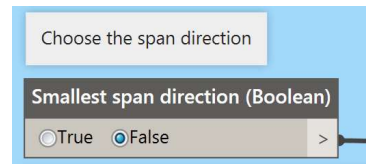
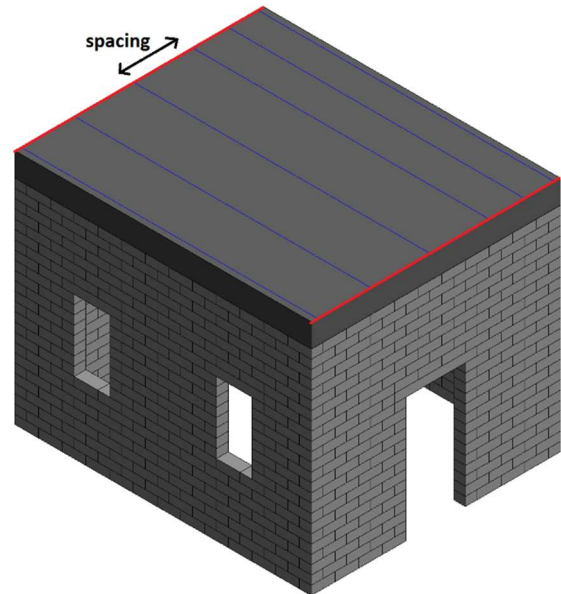


Figure 63 – Emplacement des futurs poutrains dans le cas du choix du plus grand sens de portée

Le *node* « Place poutrains » prend deux familles différentes de poutrains en argument : une pour les deux extrémités (*side beams*) et une autre pour tous les autres poutrains intermédiaires (*intermediate beams*). Le premier et le dernier élément à placer auront donc des caractéristiques différentes (largeur de base et largeur supérieure) et nécessitent des instructions particulières. L’algorithme suivi est décrit ci-dessous.

x is the relative position along the perpendicular perimeter lines, in other words, it's the distance between the floor's side and the poutrain's line

placement of the first poutrain

```
x = (base's width of the side beams)/2
placement of a side beam at a distance x
x += spacing
```

placement of intermediate poutrains

```
while x < lines_length :
    if two last beams are going to be too close :
        placement of the penultimate beam at the middle distance between its
        two neighbouring beams
    else :
        placement of an intermediate beam at a distance x
    x += spacing
```

placement of the last poutrain

```
placement of a side beam at a distance (lines_length - base's width of the side
beams/2)
```

Après l'exécution de cet algorithme sur Dynamo, on obtient par exemple le résultat présenté à la Figure 64.

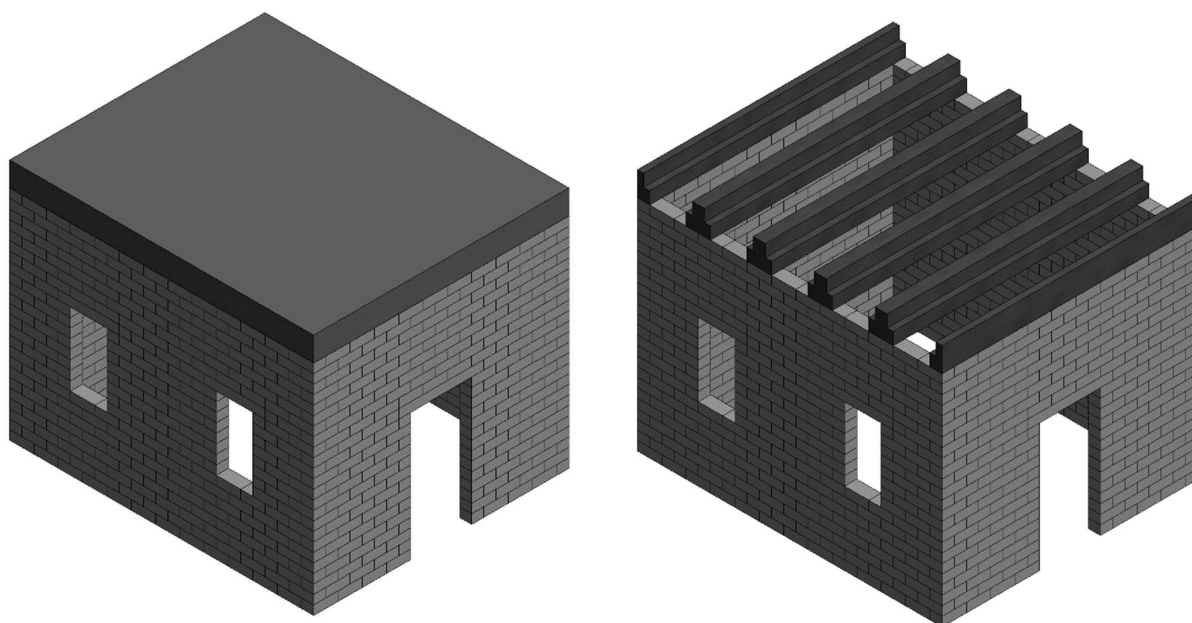


Figure 64 – Transformation d'un sol en poutrains grâce à Dyna'drone

4.3.2.2 Placement de claveaux

Le code de la routine de placement des claveaux se trouve dans le nœud « Place claveaux » du programme Dynamo (Figure 65).

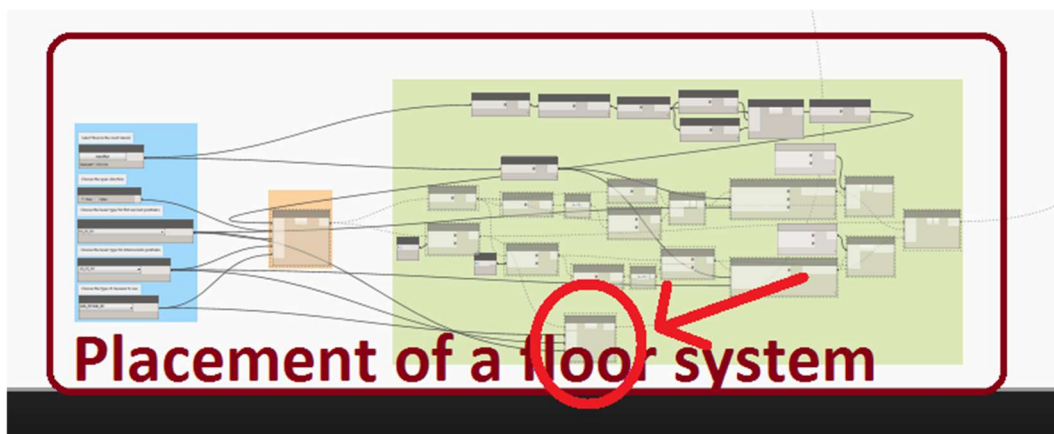


Figure 65 – Position du nœud "Place claveaux" dans la structure du programme

Une fois que les poutrains sont positionnés, les claveaux vont pouvoir être placés à leur tour. Pour cela, les droites décrivant les poutrains sont sélectionnées deux à deux (dans un ordre consécutif). Des droites de la longueur des futurs claveaux sont créées entre les poutrains. Elles correspondent à la position du milieu de la largeur du claveau et elles sont espacées de la largeur d'un claveau. Si nécessaire, la largeur du dernier claveau d'une rangée est adaptée. Cela est représenté sur la Figure 66.

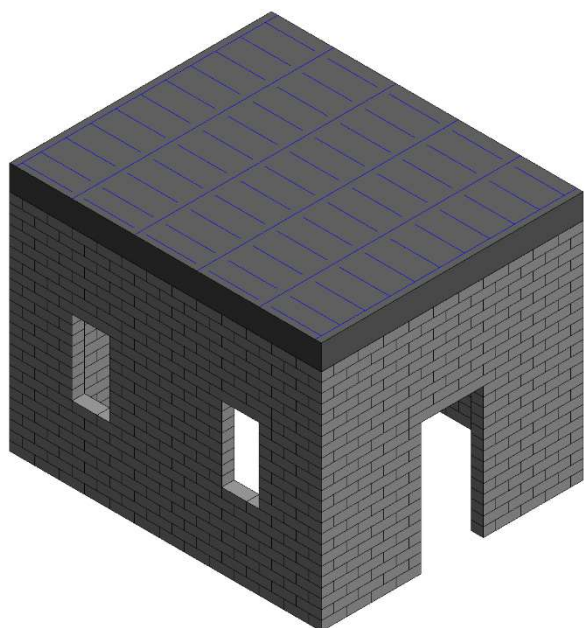


Figure 66 – Création des droites pour la position des futures claveaux

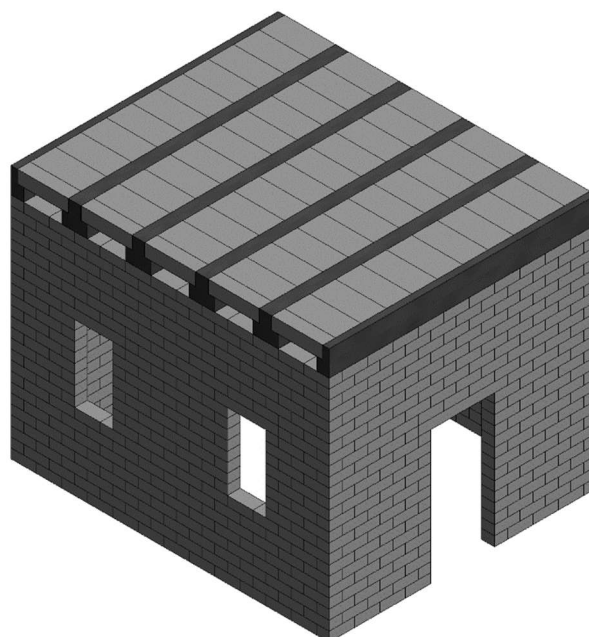


Figure 67 – Résultat d'exécution de Dyna'drone pour le placement de claveaux

Après l'exécution de cet algorithme sur Dynamo, on obtient par exemple le résultat présenté à la Figure 67.

4.4 Création de maisons en Dricks-LP-60 grâce à Dyna'drone

4.4.1 Introduction

Comme déjà présenté à la section 2.2.2 : « Les recherches à l'EPL », les « Dricks Light Plus » sont des éléments de construction *drone compatible*. En guise de rappel, les différentes briques développées sont présentées à la Figure 68. La Figure 69 présente un modèle²⁴ de bâtiment classique, constitué de Dricks Light Plus.

Dyna'drone a la force d'être un outil adaptable et facilement modulable. Afin de le prouver, les Dricks Light Plus ont été utilisés dans le programme afin de convertir facilement des modèles Revit en éléments drone compatible. Pour cela, des familles simplifiées de ces éléments ont été créées sur Revit.

²⁴ L'exemple présenté sur la figure a été construit manuellement sur *SolidWorks*, en ajoutant les blocs un à un afin de créer un exemple de combinaison de Dricks LP.

Types de blocs

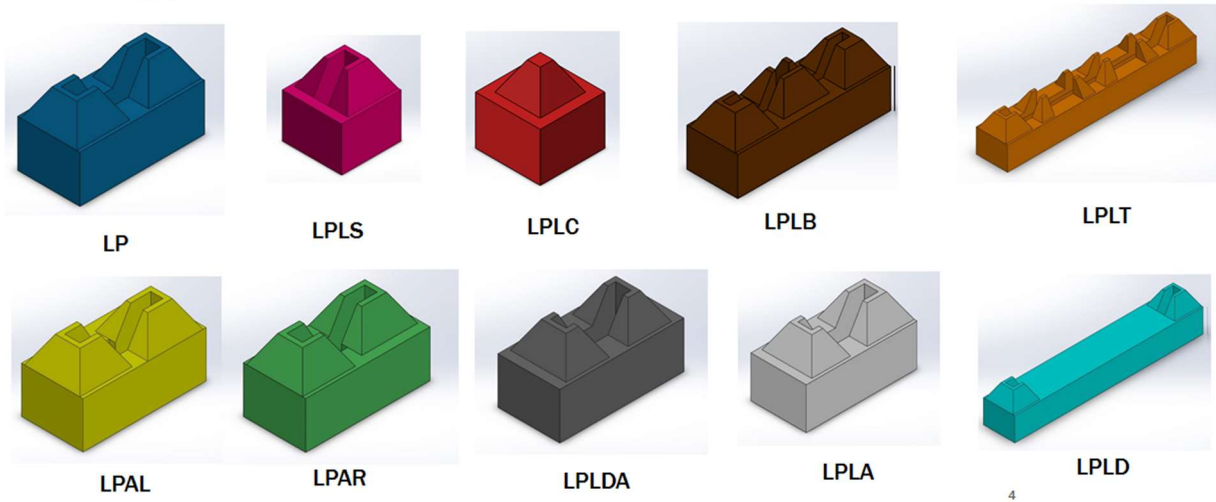


Figure 68 - Types de blocs

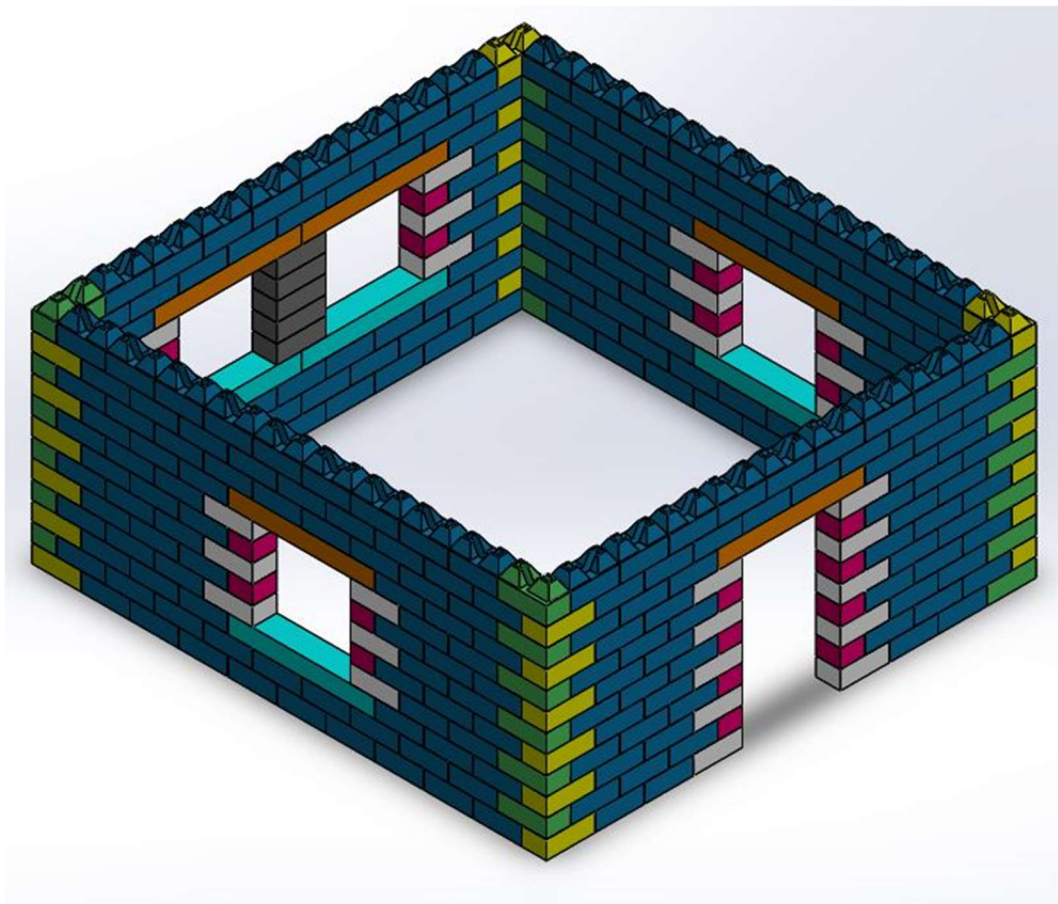


Figure 69 - Exemple de construction avec des Dricks Light Plus

4.4.2 Exécution de *Dyna'drone* avec les *Dricks Light Plus*

Comme présenté précédemment, *Dyna'drone* a été implémenté de manière la plus générique possible ; c'est-à-dire que le nœud « Slicing » ne prenait en argument qu'un seul type de blocs et de linteaux, qui étaient alors éventuellement adaptés si nécessaires. Toutefois, la manière dont les *Dricks Light Plus* ont été conçues implique que des blocs différents doivent être placés en fonction de leur utilisation. Des entrées supplémentaires ont donc été ajoutés au nœud pour tenir compte de tous ces éléments différents (voir Figure 70).

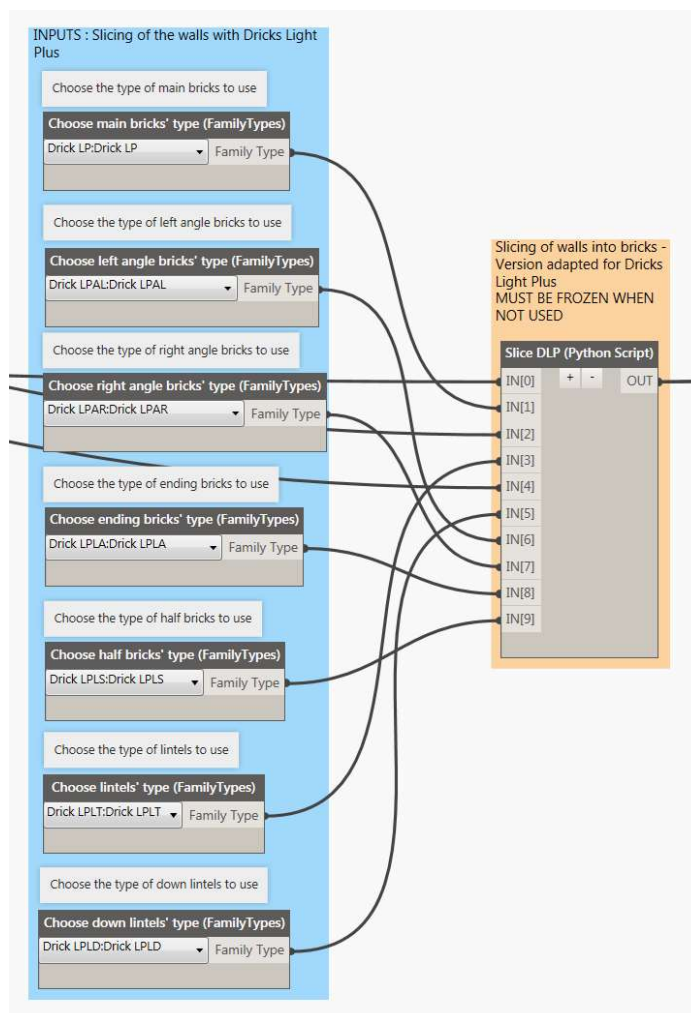


Figure 70 - Arguments d'entrée du nœud de slicing adapté pour les *Dricks Light Plus*

Au sein même du code, les différents cas de figure qu'on pouvait rencontrer pour les murs ou séquences de murs étaient bien séparés et définis (ex : séquence ouverte ou fermée de murs, ouverture dans le mur, coin, etc.). Il a donc été très simple et rapide de définir le type de bloc à placer dans un cas précis en fonction du rôle qui leur avait été attribué par leurs concepteurs.

Les Figure 71 et Figure 72 présentent des exemples de division de murs en *Dricks Light Plus* obtenus avec *Dyna'drone*. Les couleurs utilisées correspondent aux blocs présentés à la Figure 68 et Figure 69.

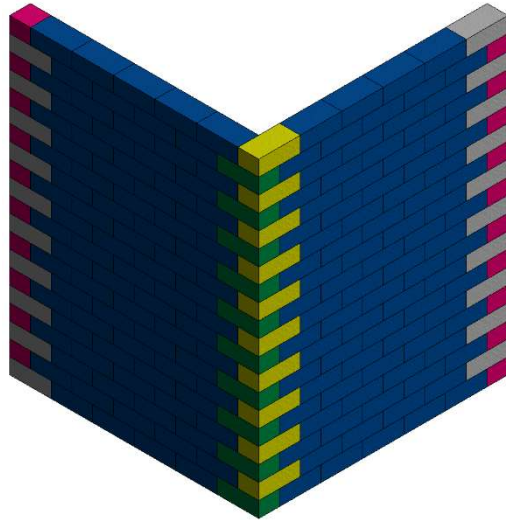


Figure 71 - Exemple d'utilisation de Dyna'drone pour une séquence de deux murs

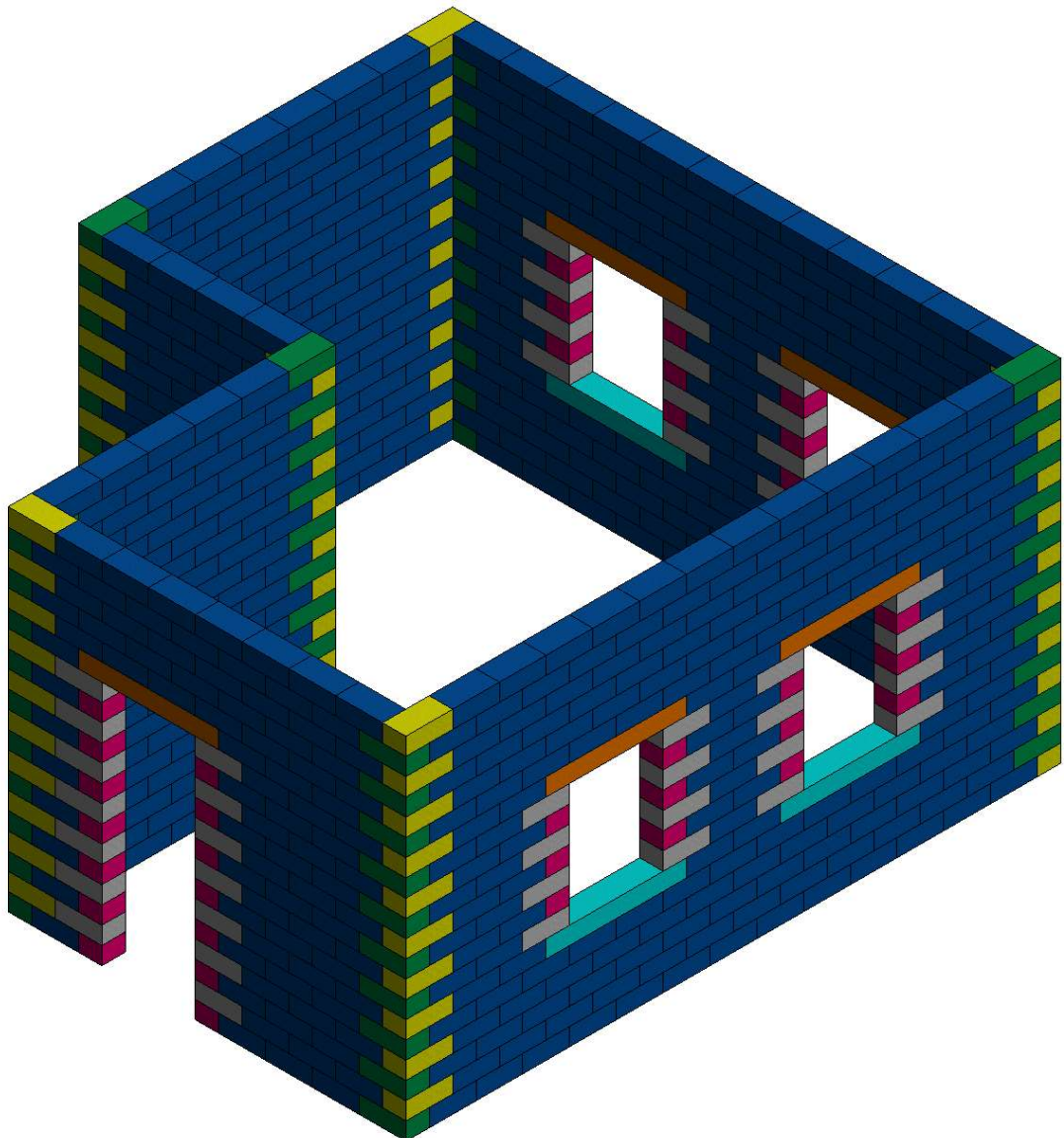


Figure 72 - Exemple de murs constitués de Dricks Light Plus, créés avec Dyna'drone

Les blocs utilisés dans ce cas-ci imposaient des contraintes pour la taille des murs et les dimensions et position des ouvertures. Il a donc été nécessaire de vérifier que le modèle était adaptable avant de lancer la conversion. Cela a pu être réalisé avec les fonctionnalités additionnelles du programme, présentées à la section 4.2.7 : « Additional features ».

4.5 Dans le futur

4.5.1 Evolution de *Dyna'drone*

Il y a évidemment plusieurs pistes qui peuvent inspirer le développement futur de *Dyna'drone*.

Tout d'abord, les évolutions futures de Revit et Dynamo permettront sans doute d'optimiser le programme créé et de l'adapter en fonction des nouvelles fonctionnalités disponibles.

Ensuite, il serait intéressant de se pencher sur des divisions de murs qui permettraient de laisser plus de choix à l'architecte. C'est-à-dire de ne pas spécialement se limiter à des murs formés de blocs empilés et décalés entre eux.

Un autre aspect important à aborder est la 4D (temps) et 5D (budget). En fonction de l'efficacité du/des drone(s), du coût de leur utilisation, de la distance du stock au chantier et de certains paramètres additionnels, il serait intéressant de donner à l'utilisateur une idée des aspects temporel et budgétaire du projet. Mais la technologie évoluant vite, il faut faire attention de bien paramétrer les calculs réalisés pour la définition du temps et du budget d'un projet *drone compatible*.

Enfin, l'interface graphique pourrait être travaillée afin d'offrir quelque chose de plus intuitif à l'utilisateur, voire même proposer un accès direct au programme depuis Revit, sans devoir passer par le lancement de Dynamo.

4.5.2 Conclusion

Dyna'drone ne semble qu'au début de son développement mais il offre déjà de très nombreuses fonctionnalités nécessaires à la construction par les drones.

Son avantage principal est son adaptabilité. Si on décide à l'avenir de changer de types de blocs ou de faire une maison avec des murs courbes, il pourra encore offrir ses fonctionnalités. Il propose des actions simples qui, ensemble, peuvent mener à des résultats plus avancés : maison à plusieurs étages (Figure 73), maison avec mur arrondi et porte-à-faux (Figure 74), utilisation de blocs de tous types (Figure 75), etc. De plus, pour l'utilisateur qui veut aller un peu plus loin, la modularité du programme lui permet de facilement modifier ou combiner les routines qui y sont implémentés. Enfin, les informations sur les éléments à placer sur chantier sont extraites de manière très simple du programme (fichier Excel) afin de pouvoir créer n'importe quel type de message en fonction de ce que le drone nécessite.

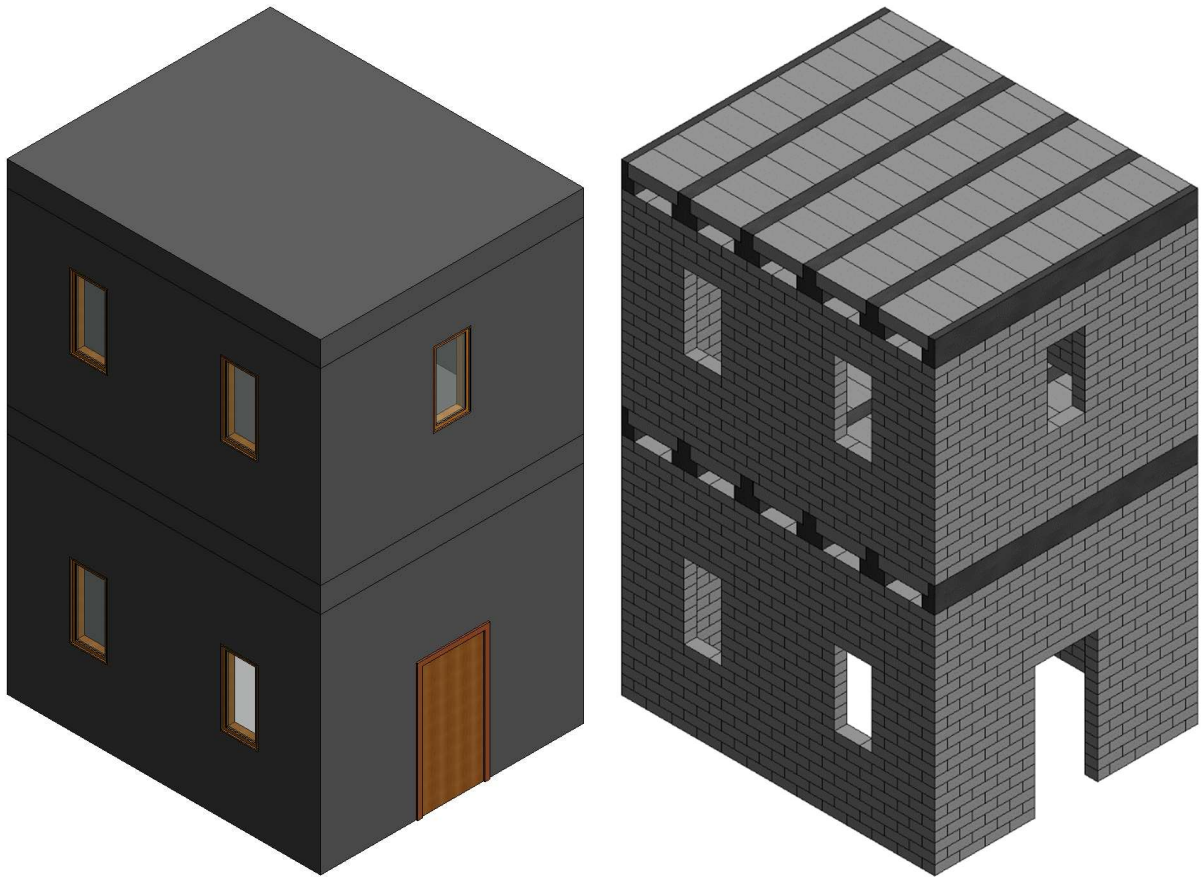


Figure 73 – Exemple d'exécution de Dyna'drone pour une maison 2 étages

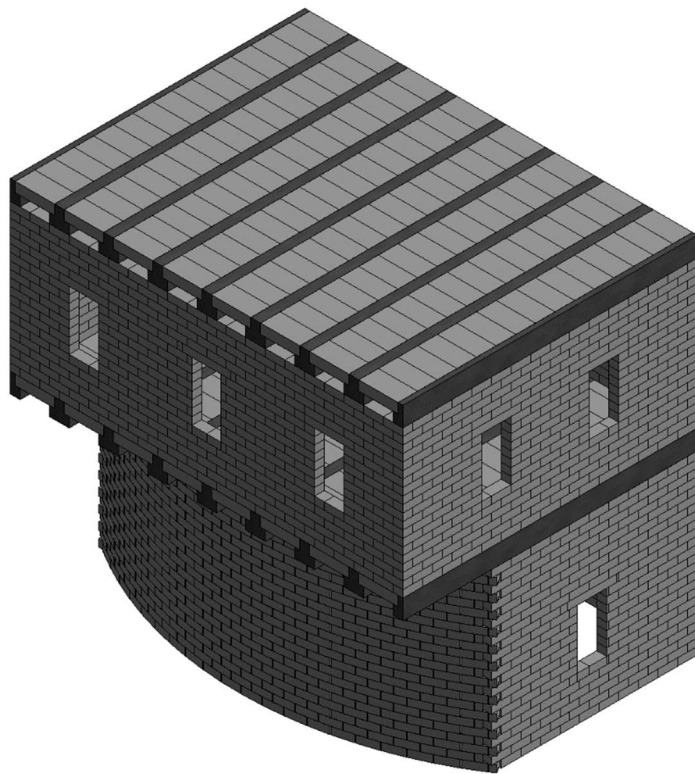


Figure 74 – Exemple d'exécution de Dyna'drone pour une maison avec un mur arrondi et un porte à faux

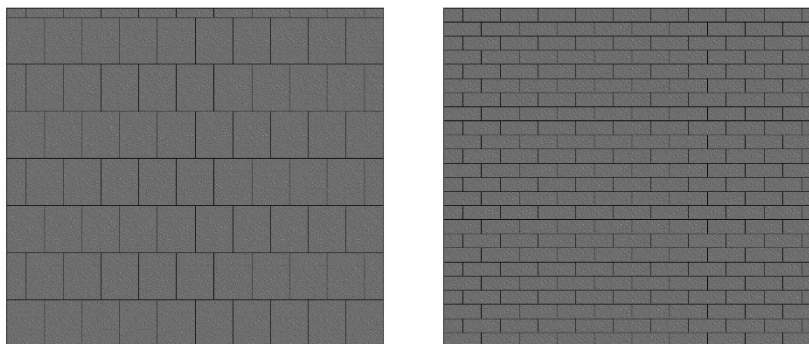


Figure 75 – Exemple d'un même mur divisé avec des blocs différents

L'autre force de *Dyna'drone* est le fait qu'il fonctionne avec Revit, un des programmes BIM les plus utilisés en Belgique. L'utilisateur peut donc continuer à travailler sur son programme habituel. Diviser son bâtiment en éléments « drone compatible » ne nécessite pas de devoir ouvrir ou redessiner son modèle 3D sur un autre programme : toute l'information reste dans un modèle unique. On évite ainsi toute duplication du modèle de base. De plus, le résultat final peut être visualisé sur Revit.

Dyna'drone ne gère pour le moment que des éléments simples de gros œuvre car l'avancement général de l'étude ne nécessite pas encore d'aller beaucoup plus loin. Pour ce travail, l'accent était mis sur le fait qu'il vaut mieux développer de manière complète chaque étape du programme que de développer en partie certaines fonctionnalités qui seraient propres à un projet en particulier mais limitées pour les autres.

L'exemple d'utilisation de *Dyna'drone* avec les Dricks Light Plus conclut d'une belle manière cette section sur le développement d'un outil de traduction d'un modèle BIM en éléments *drone compatible*. En effet, il est la preuve de l'adaptabilité du programme. De plus, ces blocs seront très probablement ceux qui seront utilisés pour les tests grandeur nature de la construction d'une structure par drone à l'EPL. *Dyna'drone* est donc déjà prêt à être utilisé par les étudiants qui concevront la future structure à construire par drone !

Chapitre 5

Conclusion



5 Conclusion

La société moderne pousse à la surconsommation et au « tout, tout de suite ! ». Les maîtres d'ouvrage sont dans la même optique et désirent la construction de leur ouvrage dans les délais les plus courts, tout en exigeant une qualité de plus en plus élevée et le tout pour un coût de plus en plus faible, afin d'avoir un retour sur investissement rapide.

Pour répondre à cette demande, un nombre important d'entreprises et de centres de recherche veulent amener les robots sur les chantiers. La majeure partie de ces recherches sont basées sur des raisonnements d'ingénieurs, qui essaient de prendre les robots des autres secteurs et de les amener tels quels dans celui de la construction. Les résultats obtenus aujourd'hui ne sont pas satisfaisant, principalement à cause de la difficulté des robots à se déplacer et à la non répétabilité des séquences d'usinage traditionnelles. Deux pistes de travail ont été proposées dans ce mémoire, afin de répondre à ces problèmes.

La première consiste au développement et à la collaboration de deux innovations récentes :

- Les drones : les drones n'ont pas du tout la même mobilité que les autres robots, ce qui va leur permettre de se déplacer et de travailler d'une manière complètement différente.
- Le BIM : le BIM va permettre de réfléchir à l'intégration des drones et des robots dès le début d'un projet et ainsi faciliter leur adaptation sur chantier. Le modèle BIM utilisé, lui, va permettre d'automatiser les tâches des drones sur le chantier et de centraliser l'information.

Pour aller plus loin dans cette idée, un projet concret est proposé pour les mémoires de l'année prochaine. Ce projet, nommé « Dron'house », sera réalisé par une équipe de cinq acteurs et aura pour objectif d'automatiser le drone et de construire la maison. L'utilisation du BIM sur le projet est nécessaire. Elle est instaurée par un protocole BIM reprenant les méthodes de collaboration et d'utilisation du modèle BIM, requises pour la réalisation du projet.

A côté de cela, un outil de traduction des modèles BIM en éléments *drone compatible* a été développé : *Dyna'drone*. Fort de son adaptabilité, il va permettre aux futurs collaborateurs du projet de modéliser sur le logiciel Revit la maison souhaitée et de la transformer en éléments *drone compatible* de leur choix. Une véritable collaboration BIM pourra donc être mise en place car toute l'information restera centralisée au sein de la maquette Revit.

La deuxième idée remet en question la manière de penser des acteurs de l'industrialisation. Les ingénieurs ont tendance à rester entre ingénieurs et il en est de même pour les architectes. Il est nécessaire que tout le monde travaille ensemble pour « réinventer » la construction. Cette réinvention est un sujet qui pourrait être développé (« brainstormé ») dans un contexte similaire aux classes d'innovations à l'EPL.

Cela fait déjà plusieurs années que des mémoires sur le sujet de la construction par les drones sont réalisés à l'EPL. De nombreuses recherches ont donc déjà été menées. Mais un des objectifs principaux des mémoires proposés cette année était de faire un grand pas vers la concrétisation du projet, afin de pouvoir réaliser sous peu les premiers réels tests grandeurs nature de construction d'une maison unifamiliale en éléments *drone compatible*. Le projet « Dron'house » et l'outil « Dyna'drone » sont donc deux points forts de ce travail, puisqu'ils permettent de préparer aussi bien le projet lui-même, que les acteurs qui vont entrer en jeu pour le réaliser.

Chapitre 6

Bibliographie



6 Bibliographie

- [1] A. Design, F. Gramazio and M. Kohler, “Made by robots,” *Architectural Design*, no. 229, p. 133, Mai - Juin 2014.
- [2] KOMATSU Corporate, «Komatsu Embarks on SMARTCONSTRUCTION: ICT solutions to construction job sites,» 20 01 2015. [En ligne]. Available: <http://www.komatsu.com/CompanyInfo/press/2015012012283202481.html>. [Accès le 30 05 2017].
- [3] KOMATSU Corporate, «KOMATSU Report 2015 - Introduction to SMARTCONSTRUCTION,» 2015. [En ligne]. Available: http://www.komatsu.com/CompanyInfo/ir/annual/html/2015/strategies/smart_construction/. [Accès le 30 05 2017].
- [4] SKANSKA, «Media : Integrating robots into construction,» 22 01 2016. [En ligne]. Available: <http://group.skanska.com/media/articles/integrating-robots-into-construction/>. [Accès le 30 05 2017].
- [5] ARCH20, «ARCH 20 “Robotization” of BIM : How Robots Could Improve BIM Workflow,» 2016. [En ligne]. Available: <http://www.arch2o.com/robotization-bim-robots-improve-bim-workflow/>. [Accès le 30 05 2017].
- [6] Robohub, « Robots Pocast #205: Hadrian bricklaying Robot, With Marc Pivac,» 02 04 2016. [En ligne]. Available: <http://robohub.org/robots-hadrian-bricklaying-robot/>. [Accès le 30 05 2017].
- [7] J. Sklar, «Robots Lay Three Times as Many Bricks as Construction Workers,» MIT , 02 09 2015. [En ligne]. Available: <https://www.technologyreview.com/s/540916/robots-lay-three-times-as-many-bricks-as-construction-workers/>. [Accès le 30 05 17].
- [8] C. Robotics, «Construction Robotics – Advancing construction,» 2017. [En ligne]. Available: <http://www.construction-robotics.com/>. [Accès le 01 06 2017].
- [9] «FastBrick – HADRIAN X,» 2017. [En ligne]. Available: <http://www.fbr.com.au/view/home>. [Accès le 01 06 2017].
- [10] ArchDaily, «Pike Loop, a robot-built installation in NYC,» 29 09 2009. [En ligne]. Available: <http://www.archdaily.com/36439/pike-loop-a-robot-built-installation-in-nyc>. [Accès le 30 05 2017].
- [11] Tuxboard, «Impression 3D : construction de 10 maisons à Shanghai en seulement 24 heures,» 26 04 2014. [En ligne]. Available: <https://www.tuxboard.com/impression-3d-construction-maisons-shanghai/#>. [Accès le 30 05 2017].
- [12] C. Thompson, «Tech insider : Robots are going to build a 3D-printed bridge over the Amsterdam Canal,» Business Insider, 16 01 2015. [En ligne]. Available: <http://www.businessinsider.com/robots-to-build-a-3d-printed-bridge-in-amsterdam-2015-6?IR=T>. [Accès le 30 05 2017].

- [13] «3D Printed Houses: A Thing of the Future or a Dead End?,» Houzz, 26 01 2016. [En ligne]. Available: <https://www.houzz.com.au/ideabooks/59972215/list/3d-printed-houses-a-thing-of-the-future-or-a-dead-end?irs=US>. [Accès le 30 05 2017].
- [14] MX3D, «MX3D Bridge,» 16 10 2015. [En ligne]. Available: <https://mx3d.com/projects/bridge/>. [Accès le 30 05 2017].
- [15] «Loisirs, surveillance... quelles sont les différentes utilisations des drones ?,» 05 01 2016. [En ligne]. Available: <http://www.numerama.com/tech/129752-que-peut-on-faire-avec-un-drone.html>. [Accès le 05 06 2017].
- [16] «Drones at race,» 26 08 2013. [En ligne]. Available: <http://ultrarunnerpodcast.com/drones-at-races/>. [Accès le 05 06 2017].
- [17] «LE DRONE-AMBULANCE AU SECOURS DES VICTIMES D'ATTAQUES CARDIAQUES,» 07 08 2015. [En ligne]. Available: http://www.magazine20minutes.com/capsules/le_drone_ambulance_au_secours_des_victimes_d_attaques_cardiaques.html. [Accès le 05 06 2017].
- [18] Olivier, «Ehang 184, le drone taxi en test à Dubai,» Les drones.com, 20 février 2017. [En ligne]. Available: <https://www.les-drones.com/actualite-du-drone/ehang-184-le-drone-taxi-en-test-a-dubai/>. [Accès le 24 mai 2017].
- [19] J.-M. Normand, «La foire du drone,» Le monde, 19 février 2017. [En ligne]. Available: http://www.lemonde.fr/la-foire-du-drone/article/2017/02/19/dubai-parie-sur-le-drone-taxi_5082034_5037916.html. [Accès le 24 mai 2017].
- [20] Aeronos, «The world first drone jump,» 2017. [En ligne]. Available: http://www.aeronos.com/eng/news/?text_id=18. [Accès le 24 Mai 2017].
- [21] F. Augugliaro, S. Lupas Hin, M. Hamer, C. Male, M. Hehn, M. W. Mueller, J. s. Willmann and F. Gramazio, "The Flight Assembled Architecture Installation," *IEEE CONTROL SYSTEMS MAGAZINE*, p. 19, 2014.
- [22] F. Augugliaro, . A. Mirjan, F. Gramazio, M. Kohler and R. D'Andrea, "Building Tensile Structures with Flying Machines," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Tokyo, Japan, 2013.
- [23] Mirjan, F. Gramazio, M. Kohler, F. Augugliaro et R. D'Andrea, «Architecture fabrication of tensile structures with flying machines,» ETH Zurich, Zurich (Switzerland).
- [24] Q. Lindsey, D. Mellinger, V. Kumar et Mechanical Engineering and Applied Mathematics, «Construction of Cubic Structures with Quadroter,» University of Pennsylvania, Philadelphia, 2011.
- [25] J.-S. Breton et J. Leplat, «FEASIBILITY STUDY FOR DRONE-BASED MANUFACTURING,» Ecole Polytechnique de Louvain (EPL), Louvain-La-Neuve, 2015.
- [26] M. Reniers, «DEVELOPMENT OF ELEMENTARY BIM TOOLS,» Ecole Polytechnique de Louvain (EPL), Louvain La Neuve, 2016.
- [27] A. Naveau et A. Moncourrier, «DEVELOPMENT OF A "DRONE-COMPATIBLE" MASONRY CONSTRUCTION,» Ecole Polytechnique de Louvain (EPL), Louvain-La-Neuve, 2016.

- [28] D. R. F. COELHO, «Certificat d'université "BIM, conception et gestion intégrées" – Le protocole BIM –,» Tournai, 2017.
- [29] J. Ramet, «Formation BIM – Gestion BIM – Implémentation d'un BIM "Low cost",» Tournai, 2017.
- [30] SYNTEC-INGENIERIE, «BIM/Maquette numérique, contenu et niveaux de développement.,» *LE MONITEUR des travaux publics et du bâtiment*, n° %15763, p. 44, mai 2014.
- [31] BIMM2FC – Certificat BIM – UCL, «Protocole BIM general,» Tournai, 2017.
- [32] B. Ferries et J. Labbaye, «Cahier des charges BIM,» Habitat 76, 2016.
- [33] Medi@construct, «Guide méthodologique pour des conventions de projets en BIM,» 2016.
- [34] A. –. VBA, «Building information modelling –Belgian Guide for the construction industry,» Oct. 2015.
- [35] M. Reniers, development of elementary BIM tools for "drone-compatible" construction systems, 2016.
- [36] Autodesk, «Download - Dynamo BIM,» 2016. [En ligne]. Available: <http://dynamobim.org/download/>.
- [37] Autodesk, «The Dynamo Primer,» 2017. [En ligne]. Available: <http://dynamoprimer.com/>.
- [38] «Intelligence artificielle,» 2012. [En ligne]. Available: <http://www.intelligenceartificielle.fr/>.
- [39] Wikipédia, «Wikipédia,» 2017. [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Robot>.
- [40] D. I. R. F. COELHO, «Le protocole BIM,» Tournais, 2017.
- [41] OmniClass™, «OmniClass,» 30 10 2012. [En ligne]. Available: <http://www.omniclass.org/>. [Accès le 31 05 2017].
- [42] T. Vandenberg, *Le BIM au quotidien – BIM, conception et gestion intégrées*, Tournai: Besix, 2017.
- [43] S. Goessens, *Présentation Midi de la recherche : "Drone-Based Additive Manufacturing of Architectural Structures"*, 2015.
- [44] Autodesk, «Dynamo Forum,» 2017. [En ligne]. Available: <https://forum.dynamobim.com/>. [Accès le 2016-2017].
- [45] A. McPhee, «What is this thing called LOD,» 01 03 2013. [En ligne]. Available: <http://practicalbim.blogspot.be/2013/03/what-is-this-thing-called-lod.html>. [Accès le 07 02 2017].

Chapitre 7

Annexe



7 Annexe

7.1 Qu'est-ce que le BIM ?

Pour comprendre le sujet de ce travail de fin d'études, il est nécessaire d'avoir des connaissances suffisantes sur ce qu'est le BIM. Voici quelques pages d'explications générales sur cette méthode.

7.1.1 Définition

Voici une définition donnée par « the guide to Building Information Modelling – Belgian Guide for the construction industry » publié par l'ADEB-VBA²⁵ :

« Le BIM est une méthode où les différents acteurs travaillent ensemble, échangent les informations efficacement (informations et géométries) et collaborent pour améliorer l'efficacité du procédé de construction (ex. moins d'erreurs, construction plus rapide) mais également construire des bâtiments qui consomment moins, sont moins chers et plus faciles à entretenir. Avec cette vision, le succès n'est pas le modèle tridimensionnel lui-même, mais l'information développée, partagée et transmise, qui permet une meilleure collaboration. »

Dans la littérature scientifique, le mot « BIM » a trois retranscriptions :

- Building Information Model
- Building Information Modeling
- Building Information Management

Le BIM n'est pas un logiciel ou un processus technique, c'est une « nouvelle » méthode de travail. Les guillemets sont utilisés. En effet, car le BIM est une façon d'échanger les informations entre les différents acteurs d'un projet mais les gens ont toujours échangé les informations pour réaliser leur projet. La différence avec cette nouvelle méthode est que les données sont échangées en utilisant une maquette 3D pour échanger les informations et communiquer. Cette maquette est à jour depuis le 1^{er} jour de la construction de l'ouvrage jusqu'à la fin du cycle de vie de celui-ci.

7.1.2 Les principes

Cette nouvelle méthode de travail est composée de nombreux concepts, développés ci-dessous à travers l'utilisation des différentes abréviations du mot BIM dans le but de mieux comprendre cette méthode.

7.1.2.1 Building Information Model

Cette méthodologie BIM est articulée autour d'un modèle 3D capable de partager l'information correctement. Ce modèle n'est pas simplement composé de géométries mais plutôt d'objets affectés de nombreuses caractéristiques et paramètres. Toutes les informations contenues par ces objets sont modifiables et disponibles tout au long du projet. Voici une liste non-exhaustive des données disponibles :

- Composition : matériau, poids, dimensions
- Propriétés : mécanique, thermique, acoustique, etc.
- Le fournisseur
- La date de réception prévue / réelle
- La date de construction prévue / réelle

²⁵ L'ADEB est le représentant et le porte-parole des grandes entreprises de construction en Belgique. L'ADEB fait partie de la Confédération Construction.

- La maintenance réalisée / à réaliser
- Etc.

L'enjeu majeur de ce modèle est de diminuer la perte d'informations entre les intervenants lorsqu'un nouvel acteur arrive sur le projet. Ceci est la principale cause d'erreur sur les chantiers. Des enquêtes ont estimé que les données sont encodées environ sept fois pendant la durée totale du projet. [29] Cela signifie que plusieurs participants (architectes, bureaux d'études, sous-traitants, etc.) sont obligés d'encoder les mêmes informations. Cela entraîne des erreurs et donc, par conséquent, des surcoûts. En utilisant un seul et unique modèle, il ne sera plus nécessaire d'encoder toutes les données à plusieurs reprises et le nombre d'erreurs pourra ainsi être réduit.

Dans le cas où le modèle est correctement réalisé, il est possible de déterminer les propriétés (consommation d'électricité, perte de chaleur, niveau acoustique, etc.) des pièces ou des bâtiments, en utilisant certains logiciels.

7.1.2.2 Building Information Modeling

Le terme « Modeling » signifie la modélisation du modèle en question par les intervenants du projet. En effet, cette maquette 3D servant de support au BIM est implémentée par les acteurs tout au long du projet. Afin de limiter (l'idéal serait de supprimer) les erreurs sur le projet, il est nécessaire que cette maquette soit mise à jour continuellement et qu'elle contienne les dernières améliorations développées. Ces mises à jour peuvent être réalisées aussi bien par l'architecte pour la conception, que par le gestionnaire de chantier lors de la construction. Il sera dès lors possible pour tout le monde d'être informé sur l'avancement du projet à tout moment et ainsi de connaître son champ d'action pour réaliser des éventuelles modifications.

7.1.2.3 Building Information Management

Actuellement, lors d'un projet de construction, le maître d'ouvrage fait appel à un architecte qui conçoit le projet. Ensuite, le bureau d'études intervient pour la stabilité et les techniques. Enfin, l'entreprise générale est définie une fois que le projet est établi et prêt à être construit.

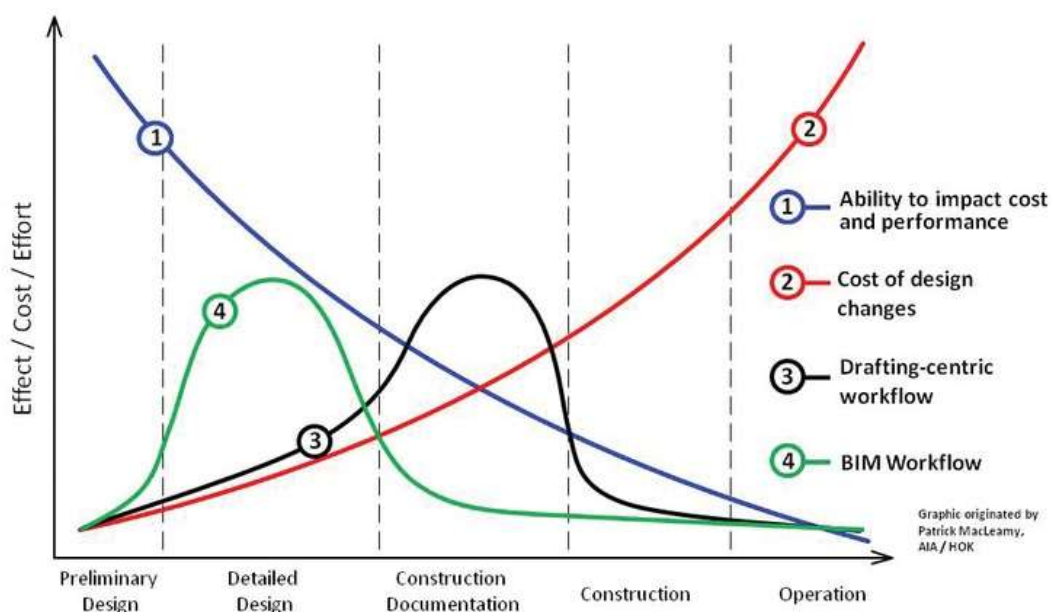


Figure 76 – Les paramètres de la construction en fonction de l'avancement du projet

Le BIM redéfinit ce processus archaïque de la construction et réunit autour de la table l'ensemble des acteurs dès le premier jour. La courbe rouge (2) de la Figure 76 indique le coût d'une modification durant l'avancement du projet. Elle exprime clairement l'importance de diminuer au maximum le nombre de modifications une fois la conception du projet finie. Le maître d'ouvrage désirent inévitablement minimiser le prix de son ouvrage, il est important que l'ensemble des acteurs commencent à travailler ensemble dès le début. Malheureusement, beaucoup de personnes n'appliquent pas cela, afin d'avoir plus de libertés, de ne pas partager son travail « gratuitement » et surtout ne pas montrer ses hypothétiques erreurs dans le modèle 3D. La première idée est compréhensible, la deuxième est défendable et fait l'objet d'enquête pour le moment mais la troisième est très regrettable. En effet l'objectif du BIM est de créer une collaboration pour diminuer le nombre d'erreurs, par exemple en superposant les maquettes de l'architecte, du bureau d'études et des techniques spéciales (ex. Figure 77 pour une structure métallique).

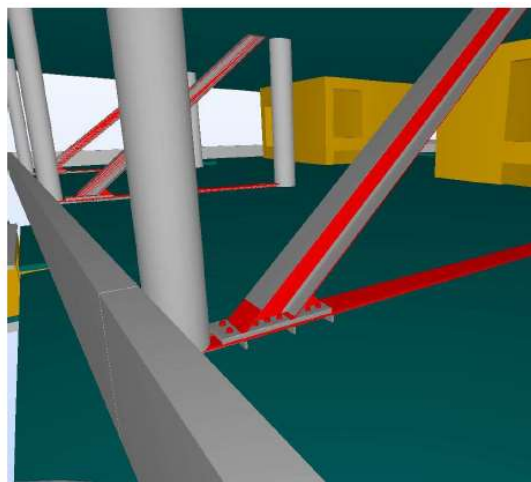


Figure 77 – Vérification d'une structure métallique en superposant la maquette de l'architecte (grise) et celle de l'entreprise de métallurgie (rouge)

En utilisant la méthodologie BIM, le projet a l'opportunité de rejoindre la courbe verte (4) plutôt que de rester sur la courbe noire (3) et ainsi de diminuer le prix du projet, tout en améliorant le résultat final. Il est dans l'intérêt du maître d'ouvrage de mettre en place le BIM sur le projet et ainsi d'améliorer le développement et la collaboration des acteurs sur celui-ci. L'ensemble des règles de cette collaboration seront déterminées par un protocole BIM.

7.1.3 Les niveaux de BIM

Le BIM est une nouvelle méthodologie de travail dans le monde de la construction et implique donc de nombreux changements. Les entreprises ont la possibilité d'intégrer le BIM au fur et à mesure en assimilant les niveaux un par un pour arriver au « BIM total ». Il y a 5 niveaux de BIM repris par la Figure 78 et décrits ci-dessous.

- **Niveau 0** : Les personnes travaillent avec des modèles 2D sur un ordinateur ou non. Les plans ne sont pas connectés entre eux et toute modification doit être reportée manuellement sur les autres plans. Les acteurs du projet communiquent par email ou fax en utilisant des fichiers non modifiables (plans papiers, scan, PDF, images, etc.).
- **Niveau 1** : Le projet est développé en 2D ou en 3D. Chaque protagoniste travaille sur son propre modèle et les plans peuvent être générés depuis le modèle 3D. Les modèles 3D peuvent être échangés entre les acteurs mais uniquement en mode lecture, ce qui empêche toute modification. Ils continuent de valider les étapes en imprimant des plans papiers.
- **Niveau 2** : Pour atteindre ce niveau de BIM, il est essentiel de créer un partenariat en utilisant un protocole BIM, qui permettra de créer une collaboration active entre les acteurs. Chaque partenaire travaillera sur son propre modèle mais celui-ci sera partagé sur une plateforme en ligne afin de superposer les maquettes et voir les interactions. La plupart des échanges seront réalisés sur la plateforme ou sur un « forum » lié à celle-ci.

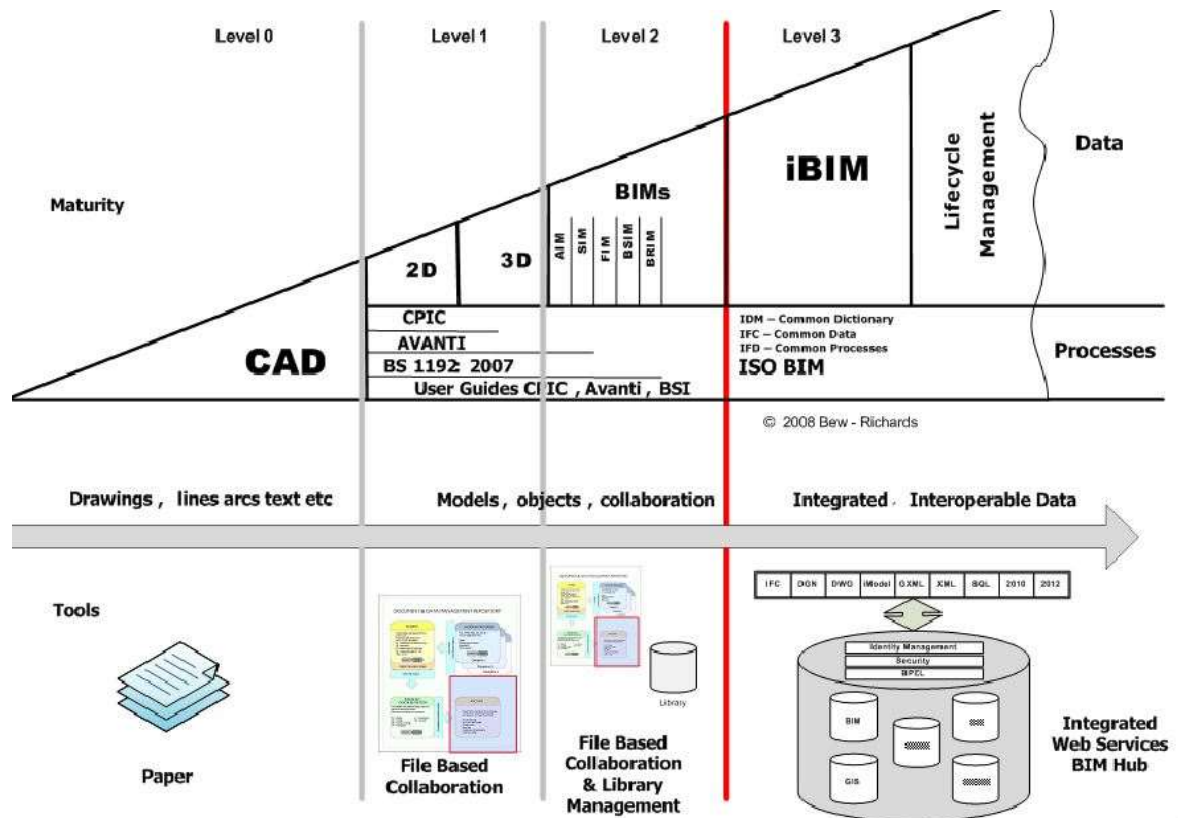


Figure 78 – Les niveaux de BIM

- **Niveau 3 :** Ceci est le niveau de BIM le plus élevé actuellement. Le projet est composé d'un seul modèle 3D construit par tous les acteurs simultanément. Cette maquette est sauvegardée sur un serveur accessible et modifiable à tout instant. La collaboration entre les « dessinateurs » est totale, ils travaillent ensemble comme une personne unique.
- **Niveau prochain :** Le « life cycle management » est en cours de développement mais n'est pas encore prêt à être utilisé. Cela consiste à réutiliser toutes les informations encodées dans la maquette pour la maintenance de l'ouvrage durant sa vie et jusqu'à sa destruction. Si certaines personnes essayent de le mettre en pratique, cela reste encore compliqué puisque les logiciels ne sont pas encore opérationnels.

7.1.4 Level of development (LOD)²⁶

Un *designer* a la possibilité de concevoir une maquette très détaillée ou pas du tout, avec ou sans informations. Afin de normaliser les modèles et de savoir ce qu'ils contiennent comme information, des niveaux de détails et niveaux de développement ont été inventés (LOD).

7.1.4.1 Level of development

LOD, pour « Level Of Development », est une mesure de la fiabilité de l'information de l'élément BIM représenté. Cela ne représente pas nécessairement la quantité d'informations présentes, même si il y a une certaine quantité d'informations requise pour atteindre un niveau de LOD particulier. Ce niveau n'est pas non plus défini par la qualité graphique de l'élément. L'apparence d'un élément BIM est seulement en guise d'information. L'entrepreneur n'a pas nécessairement besoin de savoir à quoi ressemble le bureau ni sa place dans le bâtiment ; par contre il a besoin du nom du fournisseur et du

²⁶ Ce chapitre est une traduction de l'article « LOD » du site « Pratical BIM ». [45]

numéro de l'article. Pour une question pratique, il aura peut-être besoin des dimensions mais pas de l'allure de celui-ci.

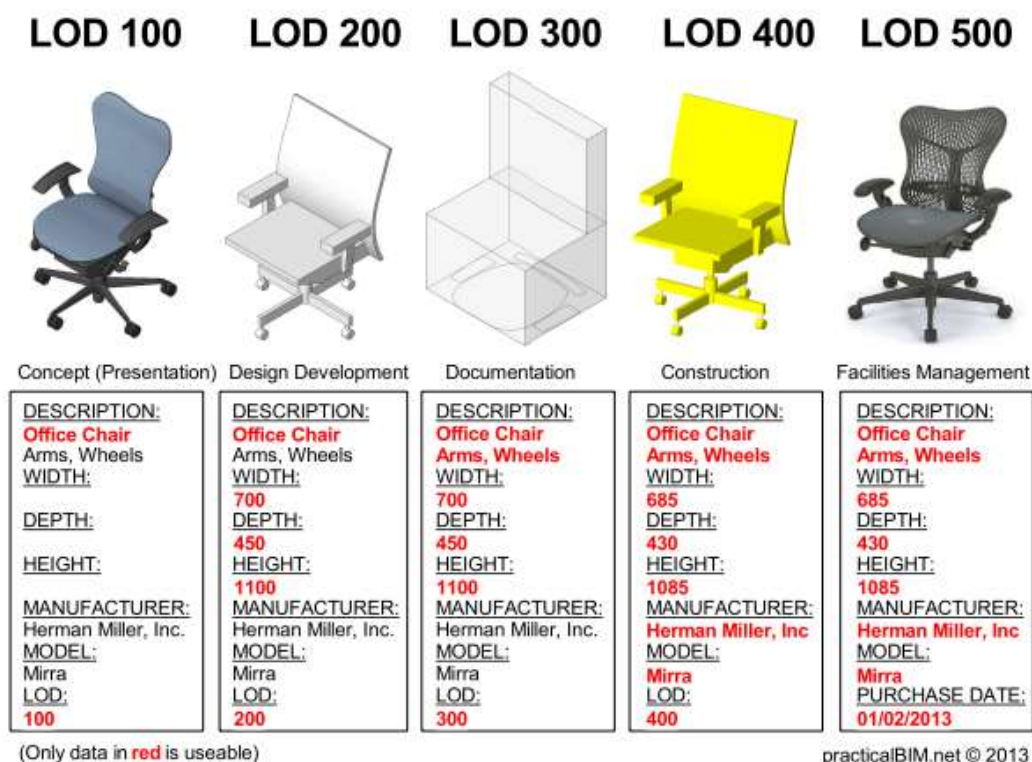
Voici un exemple de LOD pour une chaise :

- **LOD 100** : Il y a une chaise
- **LOD 200** : Il y a une chaise avec un espace requis de 500x500
- **LOD 300** : Il y a une chaise avec des accoudoirs et des roues
- **LOD 400** : Fabricant et numéro du modèle
- **LOD 500** : Fabricant et numéro du modèle, fournisseur et date de réception

Ou d'une manière plus générale :

- **LOD 100** : Il y a une chose
- **LOD 200** : Il y a une chose avec des dimensions
- **LOD 300** : Il y a une chose avec des fonctions et des options
- **LOD 400** : C'est cette chose précise
- **LOD 500** : C'est chose précise vient de cette personne à cette date

L'objectif de ce classement LOD est de dire aux autres partenaires quelles sont les informations qu'ils peuvent utiliser. Il peut être considéré comme un indice de fiabilité de l'information. Par exemple, si une chaise contient quelques informations qui satisferaient un niveau LOD 400, seule la part d'information qui satisfait un LOD 100 peut être considérée comme acquise (voir LOD 100 à la Figure 79). Ce qui signifie qu'une chaise d'un fabricant peut être utilisée pour un LOD 100 mais que tout le monde sait (en se référant au classement LOD) qu'il ne s'agit pas nécessairement de la chaise exacte qui sera utilisée pour le projet.



practicalBIM.net © 2013

Figure 79 – Level Of Development d'une chaise

Le LOD est également un outil qui permet de mesurer l'avancement. A un niveau LOD 100, il y a bien entendu plus de travail à faire pour atteindre un LOD 300. Il est possible de comparer le classement à

un pourcentage du design complet en considérant que LOD 500 = 100%, donc LOD 100 = 20%, LOD 200 = 40%, etc. Sauf que le LOD contient plus d'information, il dit quel élément est plus ou moins décisif et non uniquement son degré d'information. Il est plus utile de savoir sur un plan que le sol est complété à 60% (LOD 300), que les murs sont complets à 50% (LOD 250) et que le réseau de canalisation est seulement complété à 40% (LOD 200), plutôt que de savoir que le design complet en est à un 50% (la moyenne des éléments).

7.1.4.2 Level of details

Ce terme est peu utilisé dans le monde du BIM, mais sa définition permet d'en comprendre les raisons dans le cas où vous le rencontreriez.

Le « Level of Details » est seulement une mesure de la quantité d'information donnée. Comme il ne mesure que la quantité, rien n'affirme que toutes les informations sont pertinentes pour le projet et donc que ces informations sont fiables.

7.1.5 Conclusion

La méthodologie BIM devient un outil indispensable pour les projets de construction. Le BIM permet une collaboration active entre les acteurs du projet et, par conséquent, un échange beaucoup plus facile des données. Cela permet donc d'obtenir les informations nécessaires sur le modèle 3D et d'être certain de leur fiabilité à tout moment. Le nombre d'erreurs lors de la réalisation sur chantier est par conséquent significativement diminué.

La Figure 81 schématise les échanges réalisés sur un projet sans utiliser le BIM. La Figure 80 montre à quoi ressemble la collaboration des acteurs en utilisant le BIM, qui les relie tous à la maquette 3D, qui est elle-même liée à des fichiers communs.

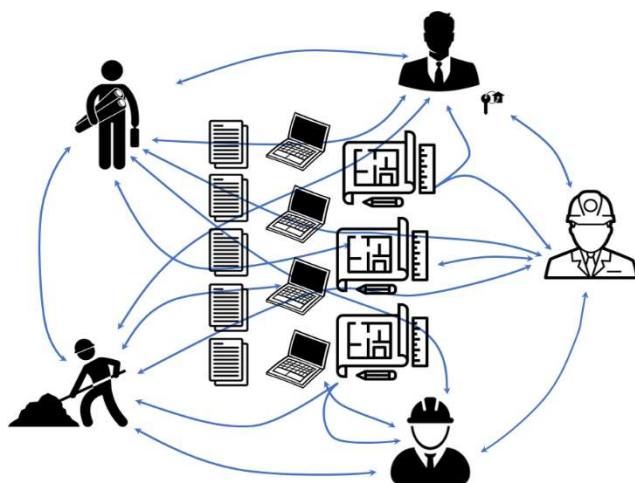


Figure 81 – Les échanges sans le BIM

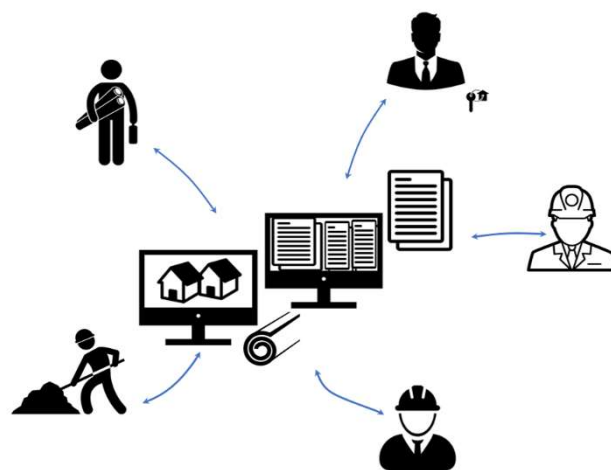


Figure 80 – Les échanges avec le BIM

Voici quelques retours généraux sur l'utilisation du BIM sur un projet.

- L'amélioration des relations et de la coordination entre les acteurs
- L'amélioration de la qualité du bâtiment fini
- La diminution des dépassements de budget
- La diminution de la sous-productivité
- La diminution des déchets
- L'amélioration de l'organisation du chantier

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique www.uclouvain.be/epi

