

Conception paramétrique de structures architecturales en bois drone-compatibles

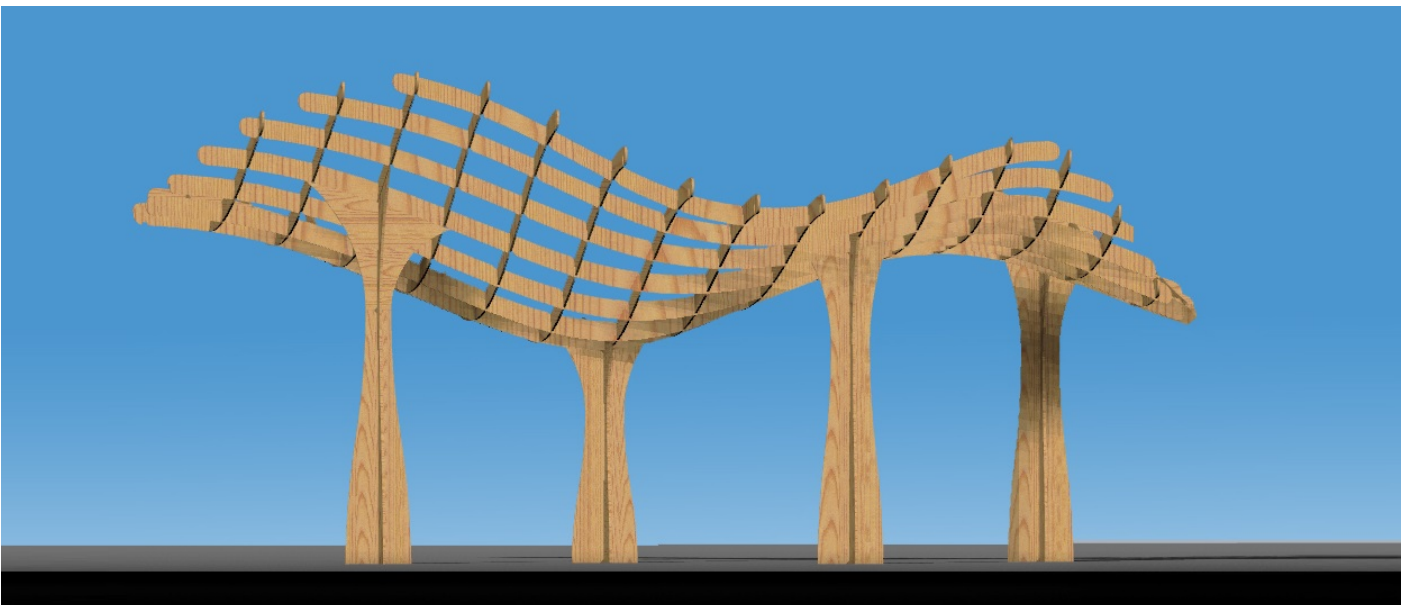
Mémoire présenté par
Gaëlle DE BEUSSCHER et Nicolas ROGEAU

en vue de l'obtention du grade de Master
GCE2M - Ingénieur civil des constructions
ARCH2M - Ingénieur civil architecte

Promoteur
Pierre LATTEUR

Lecteurs
Sébastien GOESSENS, Frank NORREBERG

Année académique 2017-2018



REMERCIEMENTS

Nous tenons, tout d'abord, à remercier très vivement notre promoteur de mémoire, le Professeur Pierre Latteur¹, pour son précieux soutien et pour l'opportunité qu'il nous a offerte d'aller présenter notre travail au *Massachusetts Institute of Technology* dans le cadre du congrès annuel de l'*International Association for Shell and Spatial structures : Creativity in Structural Design*.

Nous adressons également toute notre reconnaissance à Monsieur Sébastien Goessens¹ pour sa grande disponibilité et ses conseils avisés tout au long de l'année.

Nos plus vifs remerciements vont également à Monsieur Frank Norremberg² pour l'intérêt porté à notre recherche en acceptant de lire notre travail et de l'enrichir grâce à son expertise sur la construction en bois.

Nous souhaitons également remercier Monsieur Jean-François Rondeaux² pour son intuition en matière de calcul des structures, Monsieur Julien Geno¹ pour avoir partagé avec nous ses connaissances sur les propriétés des différents panneaux de bois et le Professeur David Vanderburgh² pour avoir attiré notre attention sur les enjeux éthiques de la robotique.

Finalement, nous tenons à remercier les nombreuses personnes rencontrées lors de cette année thématique "*Mondes Numériques - Louvain 2017-2018*" qui auront permis de faire croître la réflexion sur la place que prend le numérique dans le monde de la construction et plus globalement dans notre société.

1. Université Catholique de Louvain, Ecole Polytechnique de Louvain (EPL).

2. Université Catholique de Louvain, Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale et d'urbanisme (LOCI).

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	i
Article IASS 2018	v
Introduction	1
1 Le numérique, un enjeu majeur pour la construction	3
1.1 Contexte historique et politique	3
1.2 Révolutions de l'industrie	4
1.3 Robonumérisation de la construction	6
2 Conception paramétrique	7
2.1 Principes	7
2.2 Applications	8
3 Construire avec les drones	11
3.1 Evolution, usages et perspectives	11
3.2 Les drones et le béton	13
3.3 Les drones et le bois	15
4 Structures par empilement	19
4.1 Systèmes constructifs	19
4.2 Empilement paramétrique	20
5 Grille de panneaux entrecroisés	21
5.1 Panneaux de bois	21
5.2 Assemblage à mi-bois	24
5.3 Code Grasshopper	26
6 Montage de la structure	29
6.1 Séquence de montage	29
6.2 Système de préhension	33
6.2.1 Système de préhension à aimant	33
6.2.2 Système de préhension à clapet	34
6.2.3 Système de préhension à pinces	35
6.3 Réalisation d'un test à échelle réduite	37
7 Caractérisation mécanique	39
7.1 Résistance des colonnes porteuses	40
7.1.1 Résistance à la compression	40
7.1.2 Résistance au flambement	41
7.2 Résistance de l'assemblage à mi-bois	42

7.2.1	Résistance à un effort de compression dû à une force verticale	42
7.2.2	Résistance à un effort de compression dû à une force latérale	43
7.2.3	Calcul de résistance d'une encoche à un couple pur	44
7.3	Résistance des colonnes porteuses aux sollicitations latérales	45
7.3.1	Sollicitations selon la direction A	46
7.3.2	Sollicitations selon la direction B	47
7.4	Dimensionnement de la grille	49
7.4.1	Descente de charges	52
7.4.2	Résistance des sections	56
7.5	Résultats	58
8	Enjeux éthiques, sociaux et humanitaires	61
8.1	Éthique de la construction robotique	61
8.2	Architecture Open Source	62
8.3	Architecture d'urgence	64
	Conclusion	67
	Bibliographie	69
	Annexes	71

ARTICLE IASS 2018

L'article qui suit a été soumis dans le cadre du congrès annuel de l'*International Association for Shell and Spatial Structures* et sera présenté au *Massachusetts Institute of Technology* à Boston en juillet. Il résume, de façon condensée et en anglais, le sujet présenté au sein de ce ce mémoire.

Parametric Design of Drone-Compatible Architectural Timber Structures

Sébastien GOESSENS¹, Nicolas ROGEAU¹, Gaëlle DE BEUSSCHER¹,
Caitlin MUELLER², Pierre LATTEUR¹

¹Université catholique de Louvain UCL
Louvain School of Engineering EPL, Civil and Environmental Engineering,
pierre.latteur@uclouvain.be

²Massachusetts Institute of Technology, Building Technology Program, Department of Architecture

Abstract

The additive manufacturing of real scale structures using drones (or UAV = Unmanned Aerial Vehicle) is a new discipline with challenges as broad as the opportunities it opens up for the future. This research, carried out jointly by MIT and UCL since more than 3 years, has investigated several aspects related both to the UAVs flight behavior while transporting heavy loads and the development of “drone compatible” construction elements, in particular masonry systems [1] [2] and timber systems [3]. The challenges that such a construction process require are numerous but mainly:

- The possibility of building large scale structures composed of elements with a mass < 100 kg;
- The precise positioning of the drone. A maximum inaccuracy of 5 cm around a theoretical point is possible according to lab tests made with a big drone at the UCLouvain Dronezone.

In this context, using timber makes sense since the ratio between its weight and its mechanical characteristics is very good. Furthermore, ancient wood-to-wood connections, such as the ones inspired from the Japanese architecture, are a good source of inspiration for this research [3].

This article will focus on various complex architectural shapes of timber space structures that show the interest of combining parametric design with the drone-based construction. The structures are generated using Grasshopper and Rhinoceros 3D software in order to standardize the connections despite the complex shapes.

Keywords: drone, UAV, timber, drone compatible, additive manufacturing

1. Introduction

1.1. The “Robonumerization”: building with robots linked to numerical models

The digital revolution combined with the robotic revolution bring new opportunities for the construction sector and pushes us to rethink the way we build. As already explained in [2], the “robonumerization” of the construction should improve the profitability of the projects, as well as the execution time, the mankind working conditions, and the quality of execution.

The increasingly widespread use of BIM (=Building Information Management/Modelling) allows for a better information flow between stakeholders at the design phase. However, the execution remains a critical step at the time of interpreting what has been drawn on the computer in order to build it on site. This phase is still more critical when the complexity of what needs to be built increases. Still today, workers have to open paper plans when working on construction sites, even if the quality of the digitalization of the project is high. Using robots makes it possible to create a direct link between the design phase and the execution phase, since the numerical model can be translated directly into instructions for robots.

This involves rethinking not only the way we build but also the way we design buildings. Since it is no longer necessary to draw a plan, we can think about the project directly in terms of spatiality. Architecture is no longer the extrusion of a 2D plan, but a three-dimensional object defined by constraints and parameters. This object can be described geometrically and translated into numerical instructions. This is further developed in §2 and §3 below.

1.2. About drones

The use of drones is part of a biomimetic approach. Like birds flying back and forth to bring twigs and mud for the construction of their nest, a swarm of drones could quickly assemble a huge number of small and light elements into a real scale structure with a complex shape. The use of drones has the advantage that the complexity of the structure does not matter, since the assembly is based only on the coordinates of the points extracted from the computer 3D model. This is where the interest of linking drones and parametric design appears (figure 2).

In addition, drones can quickly fly in all directions, reach high heights and avoid the use of slow and cumbersome cranes. However, the future of construction is surely not only linked to flying robots. Indeed, future construction sites, in the next decades, will probably see the combination of several types of robots: flying robots, but also climbing robots, humanoid robots, crane robots, etc.

Figure 1 shows lab tests with masonry and timber elements, assembled with a custom-made drone capable of lifting masses up to 30 kg.



Figure 1: The drone used for the lab tests (Drone Zone UCLouvain/Belgium). On the left: assembling of masonry elements. On the right: assembling of timber beams.

1.3. About timber

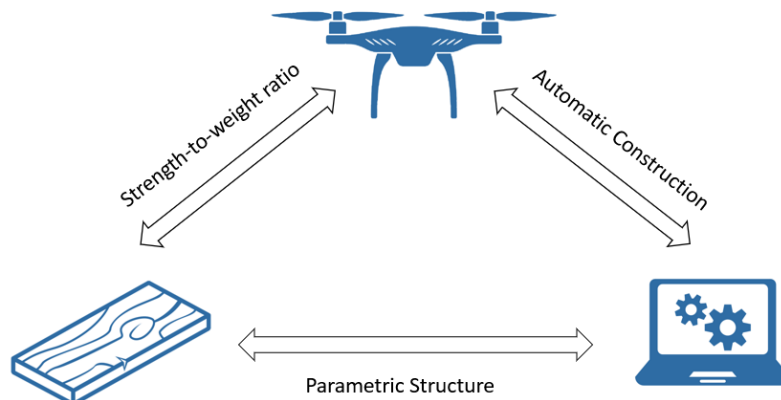


Figure 2: Development of "drone-compatible" timber structural typologies using parametric design

In addition to the fact that timber is an abundant natural resource, it has an excellent strength-to-weight ratio (comparable of that of steel) which makes it particularly well adapted for the drone-based construction.

Previous research [3] focused on adapting traditional Japanese joints in order to develop “drone compatible” timber connections, allowing a connection despite a position inaccuracy of the drone of 5 cm around the theoretical point. This paper this time investigates not only the connections, but mainly the possibility of creating drone compatible complex structures via a parametric design.

2. Stacked timber structures

The first structural topologies that were investigated are the result of the stacking of timber beams, generated with Rhinoceros 3D via the plug-in Grasshopper. An algorithm, that allows creating different iterations of stacks by varying the position of the beams relatively to each other, has been developed.

The position of each beam compared to an arbitrary fixed point in space is given by the computer code and allows a direct translation into flight instructions for the drone(s). This allows a much faster construction than with classical means, since the geometries are very complex, which shows the interest of the drone in this precise case. Here, the connections don't exist since the elements are just stacked. Adding connections is possible but would involve their parametric design combined with a CNC machine (CNC=*Computer Numerical Control*) capable of producing many different connections and with an adequate and ordered storage of the beams.

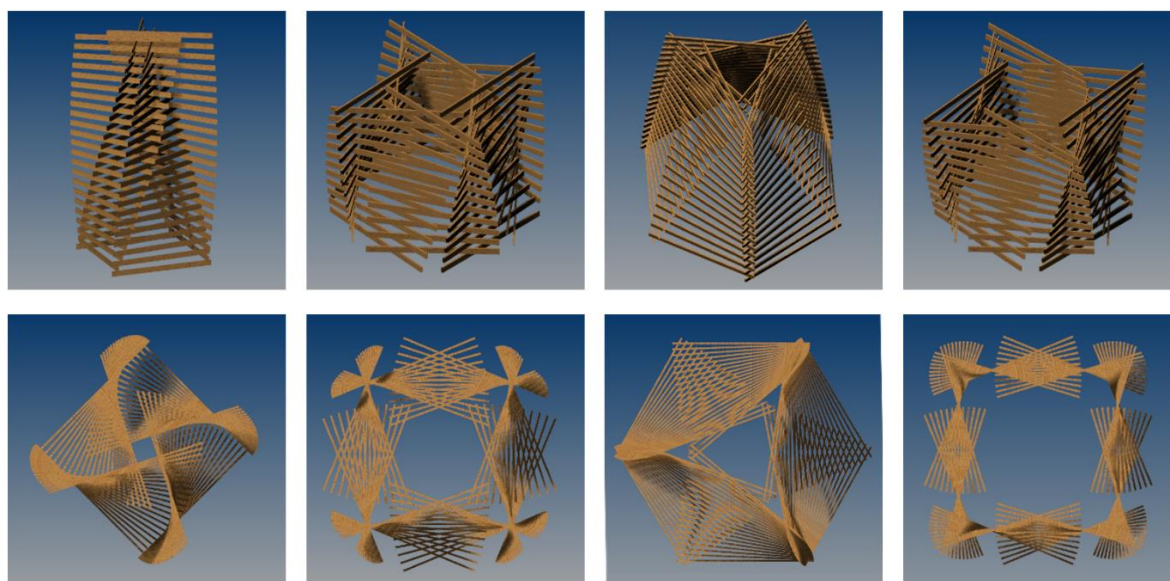


Figure 3: Different iterations of stacked timber structures

3. Interlocking timber panels

3.1. Type of panels

The use of timber panels rather than beams makes it possible to reach larger spans for the same weight by reducing the width of the sections. In addition, they can easily be cut by CNC machines, and they provide the possibility to work with elements with a variable or curved geometry.

Several types of panels are produced by the industry, among which:

- MDF/HDF (Medium/High Density Fiberboard), mainly used for furniture or interior design, it offers few structural applications and reacts very poorly to moisture.
- OSB (Oriented Strand Board) which can be found as bracing panels for walls, roofs and floors.

- CLT (Cross-laminated timber), composed of at least 3 perpendicular glued layers of solid-sawn lumber and can be used in floors and load-bearing walls.
- LVL (Laminated Veneer Lumber), made of veneer layers that offer high mechanical strength and allows manufacturing large elements with high dimensional stability.

MDF and OSB are too sensitive to moisture. CLT panels have a minimum thickness of 60 mm (3 layers of 20 mm). Therefore, LVL panels are the most appropriate choice as they combine the advantages of being available with thicknesses between 21 to 75 mm, very resistant and not very sensitive to moisture.

A source of inspiration can be the Metropol Parasol in Seville, which is composed of a multitude of independent LVL panels connected by metallic wires (figure 4/left).

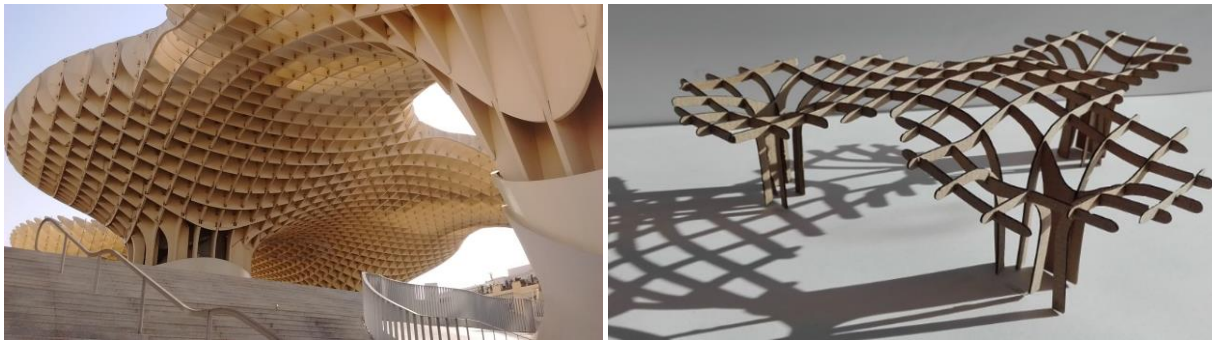


Figure 4: Study of a grid structure inspired by the Metropol Parasol in Seville (left photo: A. S. Branders)

This concept can be extended to a mesh of interlocking panels, as on figure 4/right. The advantage of the grid system is that it reduces the buckling inherent into elements with small thickness. The use of a multitude of thin elements is a major asset for the drone construction since it can lead to a broad variety of architectural and structural shapes.

3.2. Half-lap joints

These panel joints are inspired from the connections developed in [3] and only require one planar cutting plan. They should thus be compatible with an industrialized production, without increasing the overall manufacturing cost of the structure. Tests have been conducted for an accuracy of positioning set to 5 cm around a theoretical fixed point at the center of the joints, as shown in figure 5 (dimensions in cm).

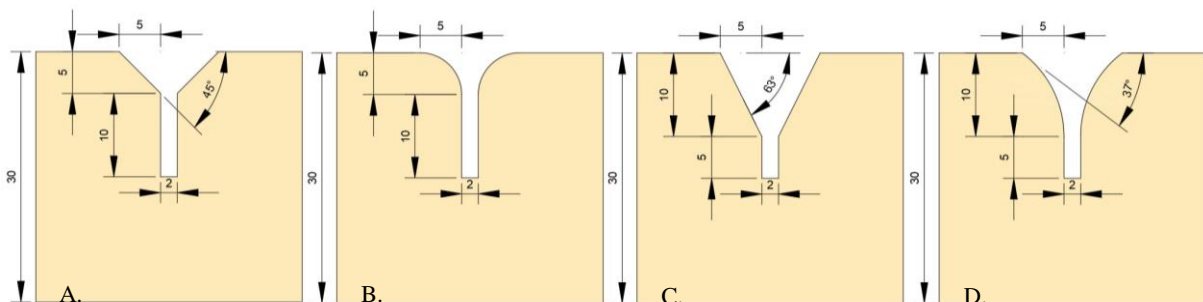


Figure 5: 4 variants of the "drone-compatible" half-lap joint (dimensions in cm).

The minimum slope required for sliding is 35° as demonstrated in [3].

With the Type A joint, the pieces tend to abut against the corner formed by the flared opening and the vertical cut as shown in figure 6 (left), which is not the case for the Type B. However, Type B reduces the tolerance with respect to the inaccuracy of the drone because the slopes decrease to zero at the beginning of the assembly, which sometimes prevent the sliding of the two pieces into each other.

The Type-C joint is an improvement of Type A joint, however the same inconvenient appears, even if it is much less frequent than with Type-A. This joint has a smaller notch, which makes the connection less rigid. The Type-D joint combines the advantages without the inconvenient of the previous ones by maintaining a tolerance of 5 cm with a minimum angle of 37° at the extremities, which is sufficient to ensure the sliding between the two panels. Finally, multiple half-lap joints can be assembled at the same the time, as shown in figure 6 (right) with Type-D joints.

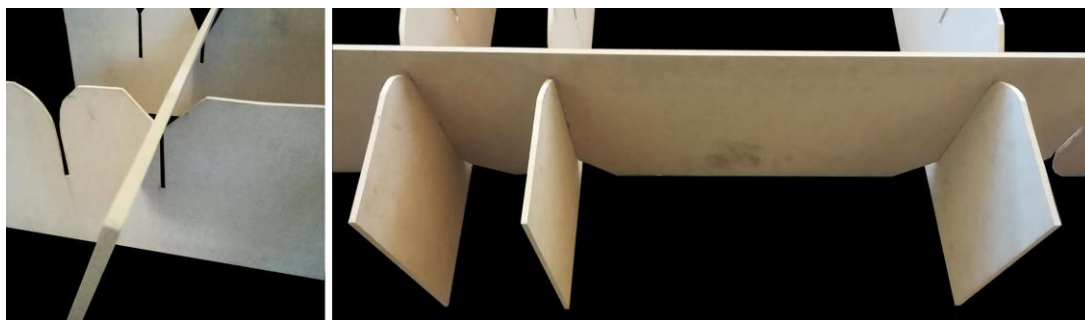


Figure 6: Type-A joint (on the left), multiple half-lap Type D joints (on the right)

3.3. Parametric design

While designing a new structure, its perimeter is first drawn with Rhino, and then transformed into a grid thanks to the Grasshopper code (figure 7/1). The grid is then projected against a NURBS (Non-Uniform Rational Basis Spline) surface whose shape can be modified with Rhino by moving the control points (figure 7/2). This makes it possible to generate, thanks to the Grasshopper code, a grid of 2D beams (figure 7/3), which geometry can be graphically modified by moving only a few points. At this stage of the process, one already has a first preview of the structure, and many different architectural possibilities can be explored easily.

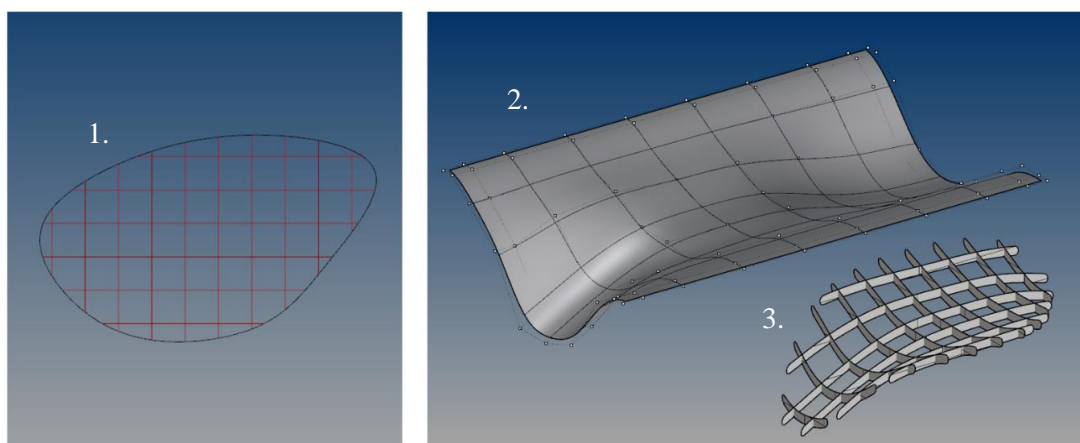


Figure 7: First steps of the parametric design of the structure

The next step concerns the determination of the 2D geometry of each beam and the position of the Type D joints notches (figure 8/right), thanks to an integration of the Type-D joint exact geometry into the Grasshopper code. A parametric shape for the supports of the grid is also generated (Figure 8/left). The same joint Type D is used for the supports, which dimensions can automatically be modified according to the thickness of the panels, the height of the structure and the shape of the NURBS surface.

The last step is the flattening of the pieces in order to export the cutting file, thanks to the grasshopper code. This methodology allows generating various 3D rendering of the structure, giving the possibility to test plethora of geometry before construction (figure 9).

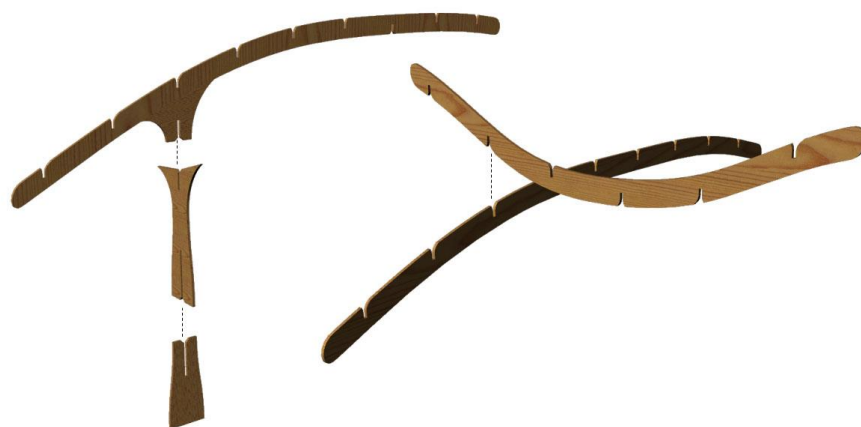


Figure 8: Positioning of the half-lap joints

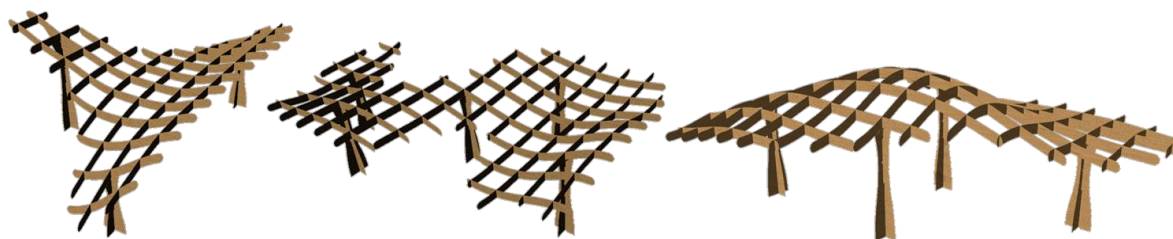


Figure 9: Multiple iterations generated by the algorithm

3.4. Assembly sequence

The orientation of each notch on the panels depends on the assembly sequence of the beams. Therefore, the assembly sequences must be determined beforehand. The construction process must begin with the placement of a first bearing structure on the supports. Then all the other beams are put in place in order to conserve the global equilibrium of the structure at each step of the construction (figure 10).

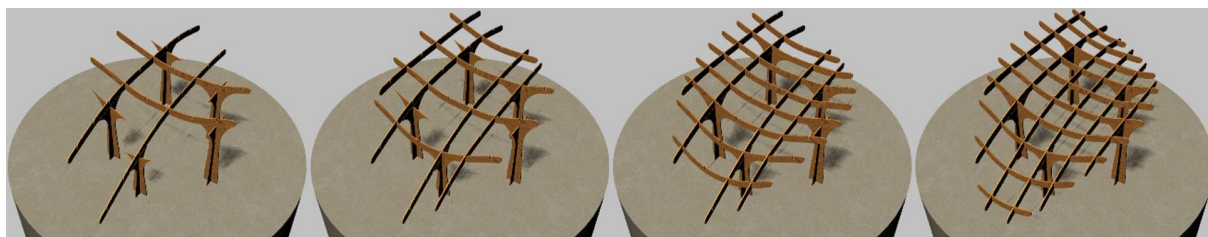


Figure 10: Assembly sequence

4. Global and local resistance

Several failure modes have been identified for the interlocking timber panels system. The following analysis is based on the Eurocode 5 (Design of timber structures).

4.1. Resistance of the Type D connections

The resistance of the joint to a compression stress can be evaluated assuming the friction forces are neglected, according to the following design criteria: $N/A \leq f_{cd}$ (1), where “A” is the area subjected to a force N, as shown in figure 11-a, and f_{cd} is the characteristic yield strength in compression of the LVL, security factors included.

The resistance to a lateral load such as wind can be considered by applying a load on the vertical edge of the notch as shown in figure 11-b. The maximum force F is also given by equation (1).

For panels with a thickness “t”, and with notches of height “h”, the resistance to a torque M due to the rotation of one panel into another as represented on figure 11-c can be evaluated by balancing the forces around the center of rotation of the connection: $M=Rh/2=th^2f_{cd}/4$.

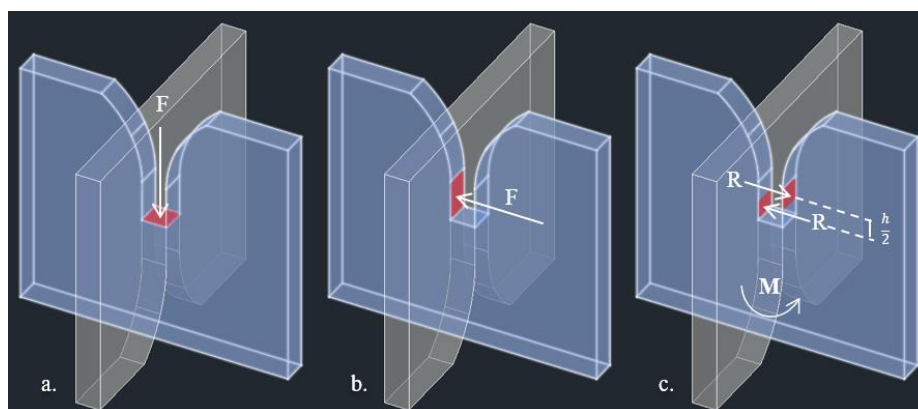


Figure 11: Rupture of the notch due to a vertical stress (a.), due to a lateral stress (b.), due to a torque (c.)

Usually the layers of LVL are oriented in the same direction, which is assumed in this article (wood fibers parallel to the axis on the beams). One considers characteristic yield strengths equal to, respectively, 3.8 MPa (compression applied on the surface, perpendicular to fibers), 7.5 MPa (compression along the edge, perpendicular to fibers) and 40 MPa (compression along the edge, parallel to fibers). With the assumption $h=50$ mm (30 mm thick panels) and taking into account a security coefficient of 1.5, an order of magnitude of the resistance is about $F=4500$ N for case a, $F=2300$ N for case b, and $M=47,500$ Nm for case c.

4.2. Resistance of the supports for lateral forces

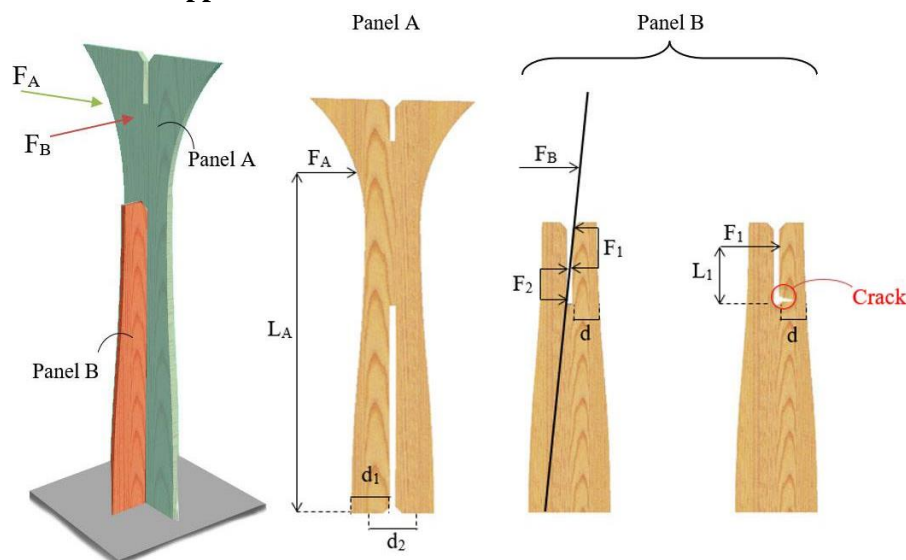


Figure 12: forces transmitted into the connections with supports

The lateral displacements of the grid, due for instance to the wind, introduces bending into the supports (figure 12). The resistance can be checked in both directions. For Panel A, the resistance at the ground level can be evaluated with (note that, this time, f_{cd} is the strength parallel to the wood fibers, security coefficients included, ≈ 27 MPa): $F_A=td_1d_2f_{cd}/L_A$. For Panel B, the rotation of upper panel A causes a compression stress into the notch. The design criterion is given by equation $6F_1L_1/t d^2 \leq f_{md}$ ($f_{md} \approx 30$ MPa, security coefficient included). Note that other design criteria have to be checked such as the shear one or the buckling one.

5. Application

Figure 13 shows an example that illustrates the structural possibilities offered by the interlocking wooden panel system.

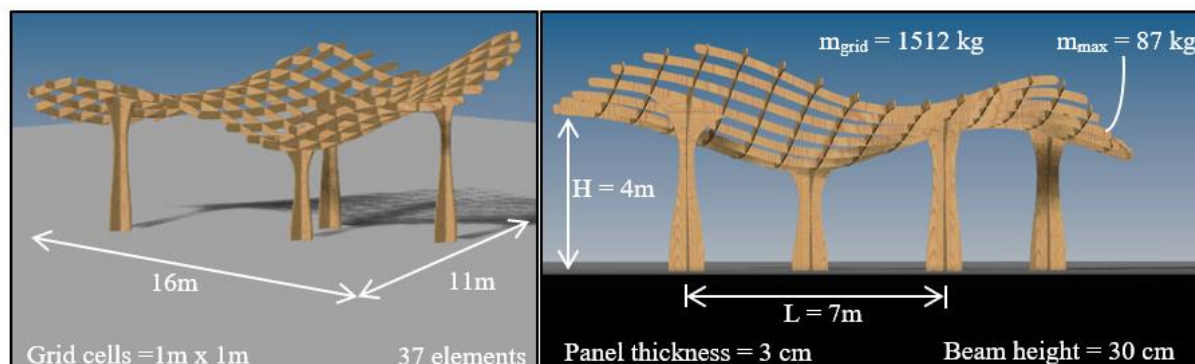


Figure 13: Dimension

This structure has been designed to resist to its own weight and some other solicitations like wind and a light covering. For panels of 3 cm width, the maximum length of the beams is limited to 18 m in order to respect the mass criterion of 100 kg.

6. Conclusion

Drone-compatible timber construction is a new research field whose future applications promise to revolutionize the building process. Exploring the development of drone-compatible structural topologies induces new ways of designing structures via parametric tools. Using flying robots for a building process allows automating the construction of complex shapes while coding the geometry into Grasshopper. This also avoids the long drawing process of all the different connections.

Using a grid of interlocking timber panels allows the development of a broad variety of shapes that can suit to different projects. The integration of the geometric constraints related to the half-lap joints into the algorithm makes also it possible to adapt the structural topology to any construction site and demonstrates the potential of building with a lot of small elements assembled by drones.

Further research should characterize the behavior of such structures and allow to automate the design process and the optimization of the geometries. Some rules could also be searched about the assembling sequences in order to ensure the stability at each construction step and avoid any scaffolding.

Acknowledgements

The authors wish to thank the MISTI MIT-UCL Seed Fund and the Belgian FRS-FNRS (Fonds de la recherche scientifique).

References

- [1] Latteur Pierre, Goessens Sébastien, Breton Jean-Sébastien, Leplat Justin, Ma Zhao, Mueller Caitlin, "Drone-Based Additive Manufacturing of Architectural Structures", International Association for Shell and Spatial Structures, Amsterdam, 17-20 August 2015.
- [2] Latteur Pierre, Goessens Sébastien, Reniers Milan, Ma Zhao, Mueller Caitlin, "Masonry Construction with drones", International Association for Shell and Spatial Structures, Tokyo, 26-30 September 2016.
- [3] Goessens Sébastien, de Furstenberg Tassilo, Manderlier Charline, Mueller Caitlin, Latteur Pierre, "A Few Aspects of Timber UAV-based Construction", International Association for Shell and Spatial Structures, Hamburg, 25-29 September 2017.

INTRODUCTION

L'utilisation des drones dans la construction est une discipline toute récente appelée à relever des défis aussi vastes que les possibilités qu'elle ouvre pour l'avenir. Depuis 4 ans, l'Université catholique de Louvain (UCL) étudie, conjointement avec le Massachusetts Institute of Technology (MIT), plusieurs aspects liés au comportement des drones lors du transport de charges lourdes et au développement d'éléments de construction « drone-compatibles ». La recherche s'est intéressée d'abord aux systèmes de maçonnerie et depuis l'année dernière, a été étendue au matériau bois car son excellent ratio résistance/poids en fait un matériau d'un grand intérêt pour la construction par drone.

Le présent mémoire vise à poursuivre le développement de la construction en bois "drone-compatible". Il a pour objectif non seulement d'approfondir la caractérisation des assemblages, mais aussi et surtout d'explorer la possibilité de créer des structures complexes compatibles avec les drones via les outils paramétriques.

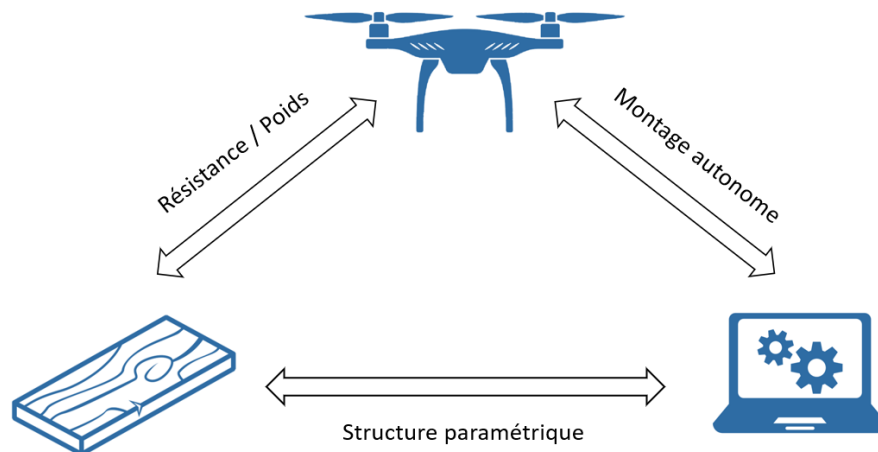


FIGURE 1 – Construire des structures paramétriques en bois avec des drones

Le premier chapitre situe la recherche par rapport au contexte technologique actuel. Il s'intéresse d'abord à l'impact du numérique sur le secteur de la construction, puis parcourt les différentes révolutions ayant mené à la "robonumérisation"³ de la construction.

Le second chapitre explique les grands principes de la conception paramétrique et son rapport avec la conception assistée par ordinateur. Ensuite, il aborde les applications possibles et l'intérêt de ce mode de fonctionnement.

Le troisième chapitre concerne spécifiquement l'utilisation des drones dans la construction. Il propose un état de l'art sur le sujet en détaillant les recherches effectuées à l'UCL.

3. Terme introduit par le professeur Pierre Latteur dans "Vers une robonumérisation de la construction" lors des 34èmes Rencontres de l'AUGC à Université de Liège en mai 2016[1]

Le quatrième chapitre traite des premières expérimentations effectuées dans le cadre de ce mémoire. Il justifie d'abord le choix de travailler avec des empilements de poutres en bois. Ensuite, il montre les possibilités qu'offre la paramétrique pour réaliser des structures complexes.

Le cinquième chapitre porte sur le développement d'un système "drone-compatible" composé de panneaux de bois entrecroisés. Il détaille notamment les différentes étapes du code informatique qui a été développé dans le cadre de ce mémoire en vue de réaliser des structures architecturales entièrement paramétrées.

Le sixième chapitre aborde les considérations techniques permettant d'assembler cette typologie structurale. Il contient les développements du système de fondation et de la méthode utilisée pour soulever les poutres avec le drone mais aussi des prescriptions nécessaires sur l'ordre de montage permettant de garantir l'équilibre de la structure.

Le septième chapitre traite des calculs liés à la résistance des différentes pièces du système en grille développé dans les deux chapitres précédents. Il aborde les différents modes de rupture possible et met en évidence la méthode utilisée pour effectuer la descente de charge.

Finalement, le huitième et dernier chapitre ouvre des pistes de réflexion sur les enjeux éthiques de l'automatisation de la construction. Il propose des applications sociales et humanitaires pour le système structural développé dans ce mémoire.

LE NUMÉRIQUE, UN ENJEU MAJEUR POUR LA CONSTRUCTION

1.1 Contexte historique et politique

Depuis leur apparition, il y a plus d'un demi-siècle¹, les robots fascinent l'imaginaire collectif. Tant la littérature que le cinéma foisonnent de références sur le sujet. Tantôt décrits comme des créatures potentiellement hostiles et capables de se rebeller contre leurs créateurs, tantôt comme des assistants entièrement dédiés au service de l'être humain, ces machines sont avant tout conçues dans le but d'automatiser les tâches laborieuses². C'est pourquoi ils ont d'abord fait leur apparition dans les usines où ils remplacent progressivement les ouvriers sur les chaînes de montage dès le début des années 1960.

L'acte de bâtir nécessite le déplacement de grandes quantités de matières, ainsi que l'assemblage souvent répétitif de nombreux éléments. La simple construction d'un mur d'1m² en maçonnerie requiert déjà une centaine de briques, soit un poids d'environ³ 150 kg. Pour de gros chantiers, certaines actions sont ainsi répétées des milliers de fois par les ouvriers.

Pourtant les robots sont encore peu présents sur les chantiers. Alors même que de plus en plus d'habitations sont désormais remplies d'équipements connectés et intelligents, le secteur de la construction accuse un retard certain sur le plan technologique, particulièrement en Europe. Chaque projet de bâtiment étant unique, innover est difficilement rentable. Le développement de nouvelles solutions constructives s'accompagne d'une prise de risque conséquente pour les entreprises.

La transition numérique

Pour remédier à ce handicap, la Commission européenne a adopté en 2010 son *Agenda numérique pour l'Europe*. Il vise notamment à « augmenter les investissements dans la recherche et l'innovation ». [3] Au niveau belge, c'est le plan « *Digital Belgium* » qui fixe, depuis 2015, les objectifs en matière de transition numérique avec pour ambition d'atteindre, d'ici 2020, le top 3 du *Digital Economy and Society Index*⁴. Tous les secteurs, y compris celui de la construction, sont concernés par ces mutations.

1. Unimate, le premier robot industriel est créé en 1961 sur les lignes d'assemblage de Général Motors pour trier des pièces de métal en fusion (une opération jusqu'alors périlleuse pour les ouvriers)[2].

2. Le terme robot vient d'ailleurs du tchèque « robota » qui signifie travail forcé.

3. Briques de terre cuite 90x190x50mm, poids moyen considéré 1,5kg/brique.

4. Indice européen relatif à l'économie digitale. En 2017, le Danemark, la Finlande et la Suède occupent les 3 premières positions, suivis des Pays-Bas, du Luxembourg et de la Belgique.[4]

Dans son rapport[5] de 2017, la Confédération Construction⁵ dresse un état des lieux de la numérisation de la construction en Belgique et identifie le potentiel des nouvelles technologies pour ce secteur. D'une part, le numérique permet d'améliorer le suivi des projets, que ce soit en matière de communication, de comptabilité, d'archivage ou encore de promotion, via le développement d'outils de gestion administrative performants. C'est le cas du BIM⁶ qui permet de faciliter l'échange des données liées à un bâtiment entre différents partenaires à l'aide de maquettes numériques 3D. D'autre part, le développement de nombreux outils technologiques, tels que la réalité virtuelle, l'impression 3D, les scanners et les robots, sont en train de révolutionner le processus de production des entreprises de la construction.

1.2 Révolutions de l'industrie

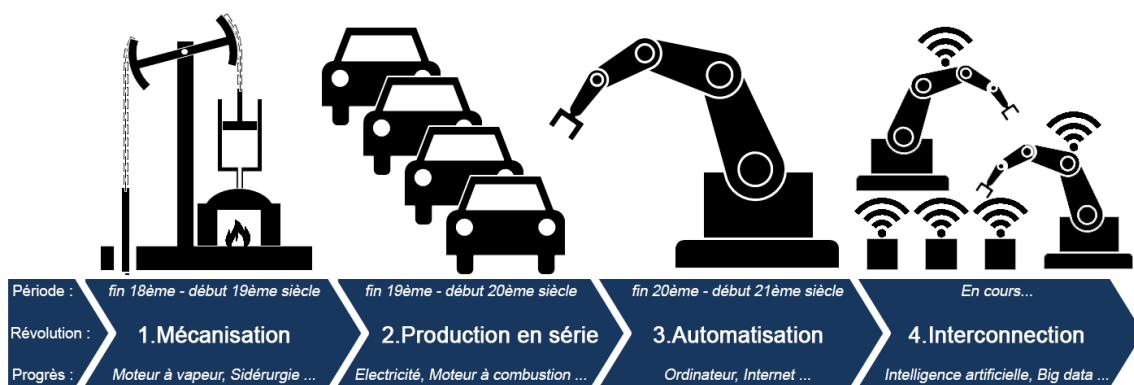


FIGURE 1.1 – Les 4 révolutions industrielles⁷

Depuis le 18ème siècle, plusieurs révolutions industrielles ont complètement transformé notre mode de production, tant dans le monde agricole que dans le monde artisanal. L'invention du moteur à vapeur, qui a permis la mécanisation progressive des industries, puis le développement de l'énergie électrique et l'apparition des premières chaînes de montage ont révolutionné le processus de fabrication. Plus récemment, l'avènement de l'électronique et d'Internet a mené à l'automatisation progressive des machines et marqué le début de l'ère de la mondialisation.

Préfabrication et standardisation

Le monde de la construction est, comme tant d'autres secteurs, en pleine mutation. La révolution digitale a permis la préfabrication de nombreux éléments, qui peuvent ensuite être rapidement assemblés sur chantier. Ce processus entraîne une diminution des coûts, un plus grand contrôle des délais et souvent une meilleure qualité de réalisation. Plus la phase de conception est bien préparée, plus la mise en œuvre du chantier est aisée et plus les risques d'erreurs lors de l'exécution diminuent. Cependant, la préfabrication limite la liberté architecturale. La standardisation à outrance peut même mener à certaines dérives comme l'absence totale d'individualisation (figure 1.2).

5. Organisation patronale belge regroupant plus de 15.000 entreprises du secteur.

6. Le BIM (Building Information Modeling/Management) concerne tout ce qui a trait à la gestion des données du bâtiments. C'est à la fois un processus d'échange entre les intervenants et un modèle 3D comprenant les informations nécessaires à sa conception.

7. Librement adapté et traduit d'une illustration de Christoph Roser © AllAboutLean.com



FIGURE 1.2 – Zone d'habitations unifamiliales à Chiang Mai, Thaïlande (2004)⁸

Dans son livre intitulé "The Fourth Industrial Revolution", le professeur Klaus Schwab⁹ introduit, en 2016, l'idée d'une quatrième révolution industrielle marquée, entre autres, par les progrès croissants en matière de robotique, d'intelligence artificielle et de nanotechnologies. Cette révolution 4.0 est également caractérisée par le développement d'une économie collaborative et circulaire visant à concilier progrès et développement durable¹⁰.

La Construction 4.0 est définie par le FIEC¹¹ comme la digitalisation de l'industrie de la construction [6]. Cette évolution revêt de nombreux aspects incluant les avancées en matière de production industrielle, l'usage croissant de la robotique, ainsi qu'un plus grand contrôle de l'évolution des constructions, que ce soit pendant le chantier ou après la mise en service.

Quelques projets innovants illustrent ces différentes facettes de la Construction 4.0. À Amsterdam, la firme MX3D¹² inaugurerait en juin 2018 un pont en acier entièrement imprimé en 3D par des robots. Une série de capteurs permettra de suivre et d'analyser le comportement de la structure en temps réel.

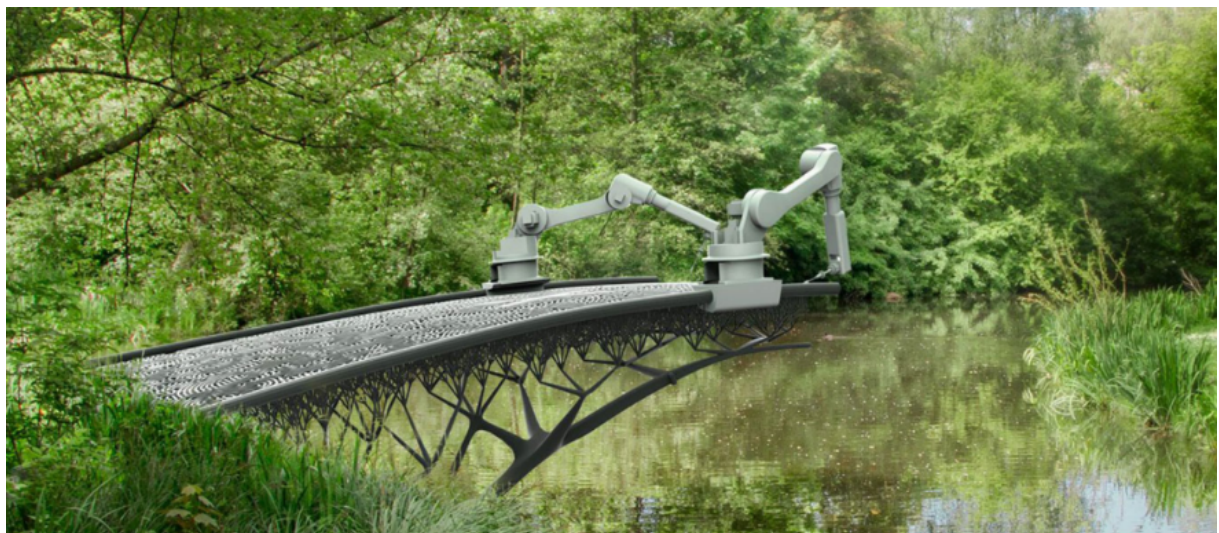


FIGURE 1.3 – Réalisation d'un pont en acier par fabrication additive robotisée, MX3D (2017)

8. © Yann Arthus Bertrand, "La Terre vue du ciel"

9. Président exécutif du World Economic Forum, organisation internationale pour la coopération public-privé.

10. Voir Section 8.2 : Architecture Open Source.

11. Fédération de l'Industrie Européenne de la Construction.

12. Entreprise néerlandaise spécialisée dans la fabrication additive métallique à l'aide de bras robotisés[7]

1.3 Robonumérisation de la construction

Cette quatrième révolution offre de nouvelles opportunités pour le secteur de la construction et invite à repenser notre façon de construire. L'utilisation de plus en plus répandue du BIM permet, aujourd'hui déjà, une meilleure circulation de l'information entre les intervenants lors de la phase de conception.

Cependant, l'exécution reste une étape critique au moment d'interpréter ce qui a été dessiné sur l'ordinateur. Cette phase de construction est d'autant plus critique que la complexité de ce qui doit être construit augmente. En effet, même avec un degré élevé de numérisation du projet, la nécessité de passer par des plans papiers persiste. Le passage à cette interface 2D intermédiaire peut être source de nombreuses erreurs lors de la réalisation. L'utilisation de robots permet, en revanche, de créer un lien direct entre la phase de conception et la phase d'exécution. Le modèle numérique peut en effet être traduit directement en instructions à transmettre aux machines.

Un enjeu économique et social

Par ailleurs, les nombreux facteurs aléatoires (intempéries, accidents...) ou humains (mauvaise coordination entre les équipes, manque de main d'œuvre qualifiée, modification ultérieure des plans...) peuvent engendrer des délais et des surcoûts importants pour un projet. Si le contrôle du climat n'est pas encore à la portée de l'homme, l'automatisation de certaines tâches difficiles permet déjà de réduire les risques d'accidents et de diminuer les imprévus sur chantier.

En conséquence, la "robonumérisation" de la construction devrait non seulement améliorer la rentabilité et le temps d'exécution des projets mais aussi les conditions de travail sur les chantiers et la qualité d'exécution des ouvrages. L'utilisation des robots pour la construction constitue donc un enjeu économique et social majeur.

CONCEPTION PARAMÉTRIQUE

2.1 Principes

La réalisation de dessins techniques à l'aide de logiciels informatiques date des années 1960 avec les premiers programmes de Dessin Assisté par Ordinateur (DAO). Le principe était relativement similaire au dessin sur papier mais avec un interface numérique et une souris en guise de crayon. Il s'agissait d'une version plus précise, plus fiable et plus pratique, de la planche à dessin traditionnelle, permettant également le passage à la 3D.

La Conception Assistée par Ordinateur (CAO) permet d'aller plus loin. Les modélisations étant effectuées à partir de fonctions numériques tandis que le DAO s'appuie uniquement sur un système vectoriel. En d'autres termes, il s'agit de logiciels "orientés objets"¹ capables d'interpréter les données assignées aux éléments et d'effectuer des simulations permettant d'économiser un temps certain dans la réalisation de métrés, d'estimations de prix, d'analyses énergétiques ou structurales...

Un algorithme interactif

La conception paramétrique est un mode de fonctionnement particulier du CAO où il est possible d'interagir avec les données en temps réel. L'intérêt est de pouvoir fixer des données d'un côté, et de manipuler des variables de l'autre. Dans le cadre de cette recherche, la précision du drone est une contrainte tandis que la forme et l'implantation des structures peuvent être variables. Il est ainsi possible de créer un algorithme qui adapte la géométrie de la structure en fonction des paramètres prédéterminés. Une typologie structurale paramétrée peut ainsi être facilement adaptée selon les contraintes du site et le programme du projet.

Saisir les opportunités offertes par la robonumérisation implique de repenser non seulement le processus de construction, mais également la manière de concevoir les bâtiments. Puisqu'il n'est plus nécessaire de dessiner des plans d'exécution, le projet peut être pensé directement en termes de spatialité. L'architecture n'est ainsi plus réduite à l'extrusion d'un plan 2D. Elle peut être considérée comme un lieu tridimensionnel défini par des contraintes et des paramètres. Ce lieu peut être caractérisé géométriquement par un code informatique (voir Chapitre 5, Section 3).

1. Il s'agit de définir chaque élément par une série de données. Par exemple, en DAO, un mur est représenté par un simple trait tandis qu'en CAO, un mur est un objet qui peut être défini par une hauteur, une épaisseur, un matériau, une couleur... ce qui permet entre autres de calculer automatiquement le prix de chaque élément et donc le coût global du bâtiment.

2.2 Applications

Un des pionniers de la conception paramétrique est l'architecte espagnol Antoni Gaudi (1852-1926)[8], en activité bien avant le recours massif à l'ordinateur. Préférant les maquettes au dessin, Gaudi a utilisé des modèles suspendus pour concevoir l'église de la Colonia Güell, puis plus tard la Sagrada Familia à Barcelone. L'architecte s'est servi de petits sacs de sable reliés par des ficelles pour représenter respectivement les charges et le trajet des efforts dans la structure. Puis, en ajustant le poids et la position des sacs ainsi que la longueur des ficelles qui les reliaient, il a pu déterminer la meilleure forme à donner à ses églises.



FIGURE 2.1 – Maquette polyfuniculaire suspendue, réalisée par Antoni Gaudi pour la conception de l'église de la Colonia Güell (1898-1914)

"Un projet architectural est défini par l'ensemble des exigences qu'il doit satisfaire"[9]. Or ces exigences sont de plus en plus complexes. Les normes architecturales en matière d'environnement, de sécurité et d'accessibilité sont beaucoup plus sévères qu'autrefois et les défis urbanistiques et programmatiques sont toujours plus importants. L'architecte ne peut dès lors plus assurer seul la responsabilité de la conception. Il doit solliciter la participation de nombreux intervenants, experts dans leur domaine.

Traditionnellement, la conception de nombreux projets est un processus linéaire. L'architecte commence par esquisser le projet à partir d'une implantation et d'un programme. Les ingénieurs dimensionnent ensuite la structure nécessaire pour faire tenir le bâtiment et y intègrent les techniques spéciales ce qui contraint l'architecte à revoir ses plans. Or, plus le projet avance, plus les modifications sont coûteuses. Une fois la construction commencée, il devient très difficile d'effectuer des changements sans nuire aux principes initiaux du projet.

De nouveaux outils pour l'architecte

La conception paramétrique permet de passer d'un processus linéaire à un processus circulaire en prenant en compte, dès le départ, les contraintes techniques à l'architecture. Chaque intervenant intègre les contraintes qui lui sont propres au sein d'un algorithme commun évolutif. En manipulant les paramètres, il devient alors possible de tester différentes configurations virtuelles répondant aux exigences structurelles, techniques et architecturales. Le but n'est pas de remplacer le concepteur par un ordinateur mais plutôt de développer de nouveaux outils permettant de guider l'architecte, l'urbaniste ou l'ingénieur dans leurs choix.

De nombreux bureaux d'architecture utilisent déjà la conception paramétrique pour créer des formes complexes (souvent avec peu de considération pour leur contexte physique ou culturel). Depuis les années 1960, de nombreux bâtiments aux formes organiques, comme le Kunsthaus de Graz (figure 2.2), ont ainsi été réalisés en s'inspirant de ce que la nature produit depuis des millions d'années. Le paradoxe étant que là où la nature cherche toujours à minimiser la matière en fonction des efforts, la blobitecture² nécessite souvent des moyens structurels démesurés pour maintenir ces formes particulières en place.



FIGURE 2.2 – Peter Cook and Colin Fournier, Kunsthaus Graz (2003)

Une meilleure maîtrise du comportement structural des ouvrages peut mener à optimiser la géométrie comme sur la figure 2.3. L'utilisation du paramétrique a permis aux concepteurs de conjuguer un désir architectural, lié à l'implantation de leur ouvrage sur le site, avec une réponse structurale rationnelle basée sur le diagramme des moments fléchissants.



FIGURE 2.3 – Passerelle à Knokke, NEY & Partners (2007)

2. Terme introduit en 1995 par l'architecte Greg Lynn, pionnier de la conception assistée par ordinateur, pour désigner ce courant architectural.

CONSTRUIRE AVEC LES DRONES

3.1 Evolution, usages et perspectives

Les premiers prototypes d'appareils volants pilotés à distance ont vu le jour il y a moins d'un siècle. Issus du domaine militaire, ils ont trouvé leur place dans le domaine civil dès le début des années 2000 pour effectuer des tâches de cartographie, de maintenance, de surveillance, de promotion ou encore de logistique. Leur capacité à survoler de grandes zones en un temps record leur permet de collecter de grandes quantités de données depuis le ciel, ou encore d'aller inspecter des endroits difficiles d'accès.

Actuellement, les drones sont utilisés dans le secteur de la construction principalement pour réaliser des modélisations précises et détaillées du site d'un projet, ainsi que pour surveiller des chantiers à distance. La législation n'autorise pas encore le transport de matériaux de construction par les drones bien que les opportunités soient nombreuses. En effet, pour des raisons de sécurité, le poids des éléments embarqués sur le drone est encore limité.

Livraison postale

Néanmoins, depuis 2016, les premières livraisons par drone opérées par la société privée Amazon, au Royaume-Uni, et la Poste, en France, ont montré qu'il était possible d'acheminer des colis d'environ 3 kg sur des distances d'une dizaine de kilomètres en toute sécurité.



FIGURE 3.1 – Prototype du drone de livraison développé par DPDgroup/La Poste (2016)

Le transport de charges allant jusqu'à une centaine de kilos¹ pourrait ainsi voir le jour dans un futur proche. Certaines entreprises comme la multinationale chinoise Huawei effectuent déjà des tests avec des « drones-taxis » dans le but de transporter des êtres humains dans un horizon de quelques années.



FIGURE 3.2 – EHANG 184, le véhicule aérien autonome développé par Huawei (2016)

Les drones présentent différents avantages pour le secteur de la construction. Ils peuvent :

- voler rapidement dans toutes les directions;
- atteindre des hauteurs importante;
- éviter l'utilisation de grues qui peuvent se révéler lentes et encombrantes.

Cependant, le futur de la construction n'est sûrement pas seulement lié aux robots volants mais plutôt à une combinaison de plusieurs types de robots : bras articulés, grues autonomes, robots grimpants, roulants voire humanoïdes.

Comme la nature

L'idée d'utiliser les drones pour construire fait partie d'une approche biomimétique [1]. En effet, à la manière des oiseaux qui font des allers-retours entre leur nid et les berges environnantes pour y ramener des brindilles et de la boue, un essaim de drones pourrait rapidement assembler un grand nombre d'éléments petits et légers pour réaliser des structures aux formes complexes. L'avantage d'utiliser des drones est que la complexité de la structure n'a pas d'importance puisque le montage est basé uniquement sur les coordonnées des points extraits du modèle 3D de l'ordinateur. C'est ici que l'intérêt de relier les drones et le design paramétrique apparaît.

Les architectes Gramazio et Kohler sont les premiers à avoir combiné l'utilisation des drones et du paramétrique pour réaliser, en 2012, une installation architecturale de 6 m de haut, composée de 1500 briques de polystyrène déposées l'une après l'autre par 4 petits quadricoptères autonomes. La forme complexe de la tour aurait été particulièrement complexe à réaliser sans un système entièrement automatisé. La capacité des drones à se déplacer facilement en tout point de la structure s'avère être un précieux atout.

1. Au-delà de 100kg, la taille des drones nécessaires approcherait celle d'un hélicoptère.



FIGURE 3.3 – Flight Assembled Architecture, Gramazio, Kohler et Raffaello D’Andrea (FRAC Centre Orléans, 2011-2012)

3.2 Les drones et le béton

Depuis 2014, l’Université catholique de Louvain (UCL) mène un projet de recherche en collaboration avec le Massachusetts Institute of Technology (MIT) sur la faisabilité de la construction par drone. Les objectifs du projet de recherche se déclinent en 3 axes :

- Le développement de systèmes structuraux « drone-compatibles », donc adaptés aux contraintes liées au déplacement et à la précision du drone.
- L’amélioration du système de positionnement du drone dans l’espace et de sa stabilité lorsqu’il est soumis à des charges lourdes.
- La création d’outils numériques permettant de faire le lien entre le robot et le modèle virtuel de l’ordinateur.

Les premiers travaux ont permis la réalisation d’essais sur des systèmes de maçonnerie pouvant être assemblés comme des blocs LEGO™ [10]. Une précision de l’ordre de 5 cm a pu être atteinte lors des tests réalisés à la Drone Zone de l’UCL grâce à un drone construit sur mesure et piloté manuellement. Plusieurs types d’éléments pesant jusqu’à 30 kg ont ainsi pu être conçus en prenant en compte la tolérance nécessaire à l’emboîtement.



FIGURE 3.4 – Mur de Dricks²

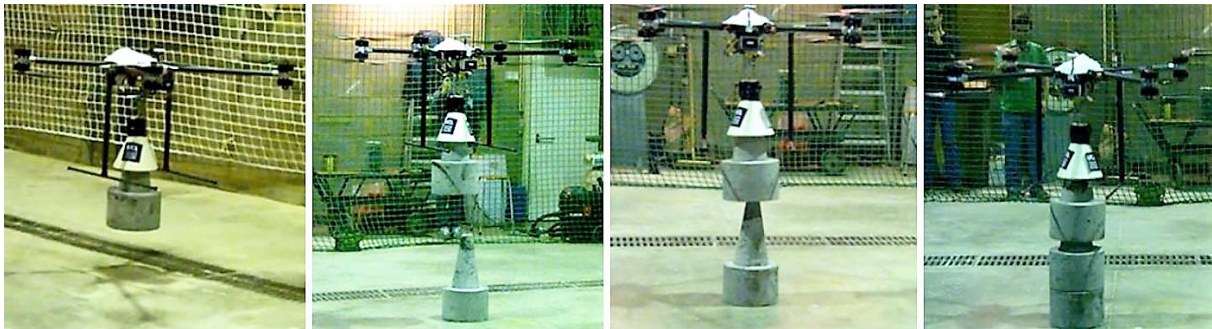


FIGURE 3.5 – Colonne à base d'éléments drone-compatibles circulaires en béton.

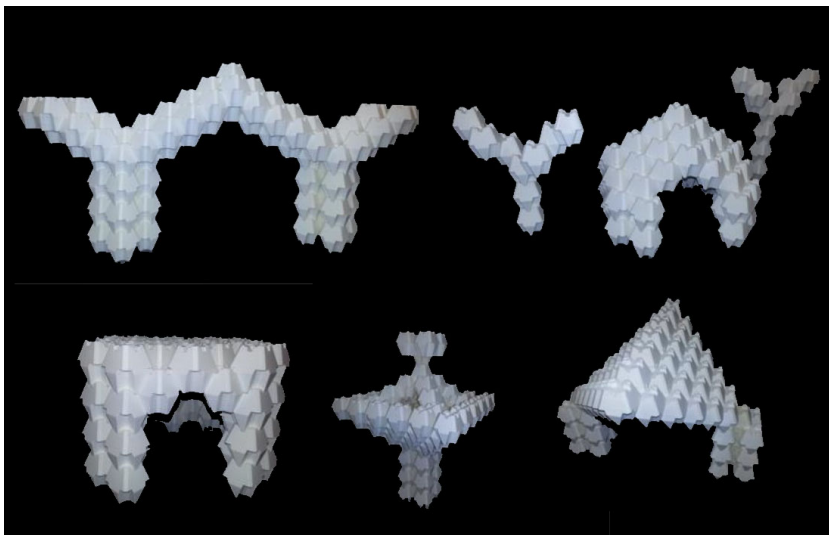


FIGURE 3.6 – Les Droxels³ permettent de réaliser des formes plus complexes

2. Néologisme pour "drone-compatible bricks".
3. Contraction de "drone" et "pixels".

Un système d'électroaimant est attaché au drone afin de lui permettre de soulever les éléments. La connexion se fait via des plats métalliques intégrés dans les blocs où le béton est coulé. L'utilisation d'aimants permanents permet d'économiser la batterie du drone puisque seul le décrochage de l'élément requiert de l'énergie supplémentaire. Les plats métalliques doivent cependant présenter des dimensions suffisantes pour développer la force magnétique nécessaire au levage.

L'avantage d'utiliser le béton est qu'il est possible de fabriquer des modules de formes très variées avec une assez bonne résistance. Cependant, le poids important des éléments limite la taille et la portée des blocs qui peuvent être empilés avec des drones.

3.3 Les drones et le bois

Depuis l'année dernière, les recherches ont été étendues au matériau bois dans le but de travailler avec des éléments plus légers [11]. En effet, le bois offre un excellent rapport résistance/poids. Ce ratio est largement supérieur à celui du béton et dépasse même légèrement celui de l'acier.

Ratio résistance mécanique/masse volumique des matériaux de construction			
	Béton	Acier	Bois lamellé-collé
Résistance en flexion (MPa)	30	350	30,6
Masse volumique (kg/m ³)	2 400	7 850	560
Ratio (x106 N-m/kg)	0,013	0,044	0,055

TABLE 3.1 – Le bois offre un rapport résistance/poids meilleur que celui du béton et de l'acier ⁴

Un étude de faisabilité sur les structures en bois drone-compatibles a été réalisée par Charline Manderlier et Tassilo de Furstenberg[12]. Ils ont démontré qu'il était possible de s'inspirer des joints traditionnels japonais pour développer des assemblages en bois prenant en compte les contraintes liées aux drones. L'adaptation de ces assemblages traditionnels consiste à permettre un emboîtement vertical des éléments, tout en conservant une tolérance de 5cm (autour d'un point fixe théorique) due à l'imprécision de l'appareil.



FIGURE 3.7 – Assemblage en bois drone-compatibles
C. Manderlier et T. de Furstenberg (2017)

4. Source : Cécobois (Centre d'Expertise sur la Construction Commerciale en Bois au Québec)

Les assemblages qui ont été considérés jusqu'à présent sont uniquement de type bois-bois. L'utilisation de connecteurs métalliques a été exclue, en raison de l'impossibilité actuelle pour un drone de visser, boulonner, clouer...⁵ L'hypothèse retenue était d'utiliser les propriétés hygroscopiques du bois. En effet, le bois sec mis en oeuvre gonfle lorsqu'il absorbe l'humidité contenue dans l'air. Il s'agit traditionnellement d'un phénomène nuisible pour les constructions en bois car les variations dimensionnelles créent des contraintes supplémentaires. Le gonflement du bois s'il est bien maîtrisé, peut néanmoins servir à bloquer les assemblages.

Au total, 7 types d'assemblages traditionnels ont été adaptés à la construction par drone dans le cadre de cette étude de faisabilité. Les deux premiers types sont dédiés à la construction par empilement, et les cinq autres aux constructions de type poteaux-poutres.

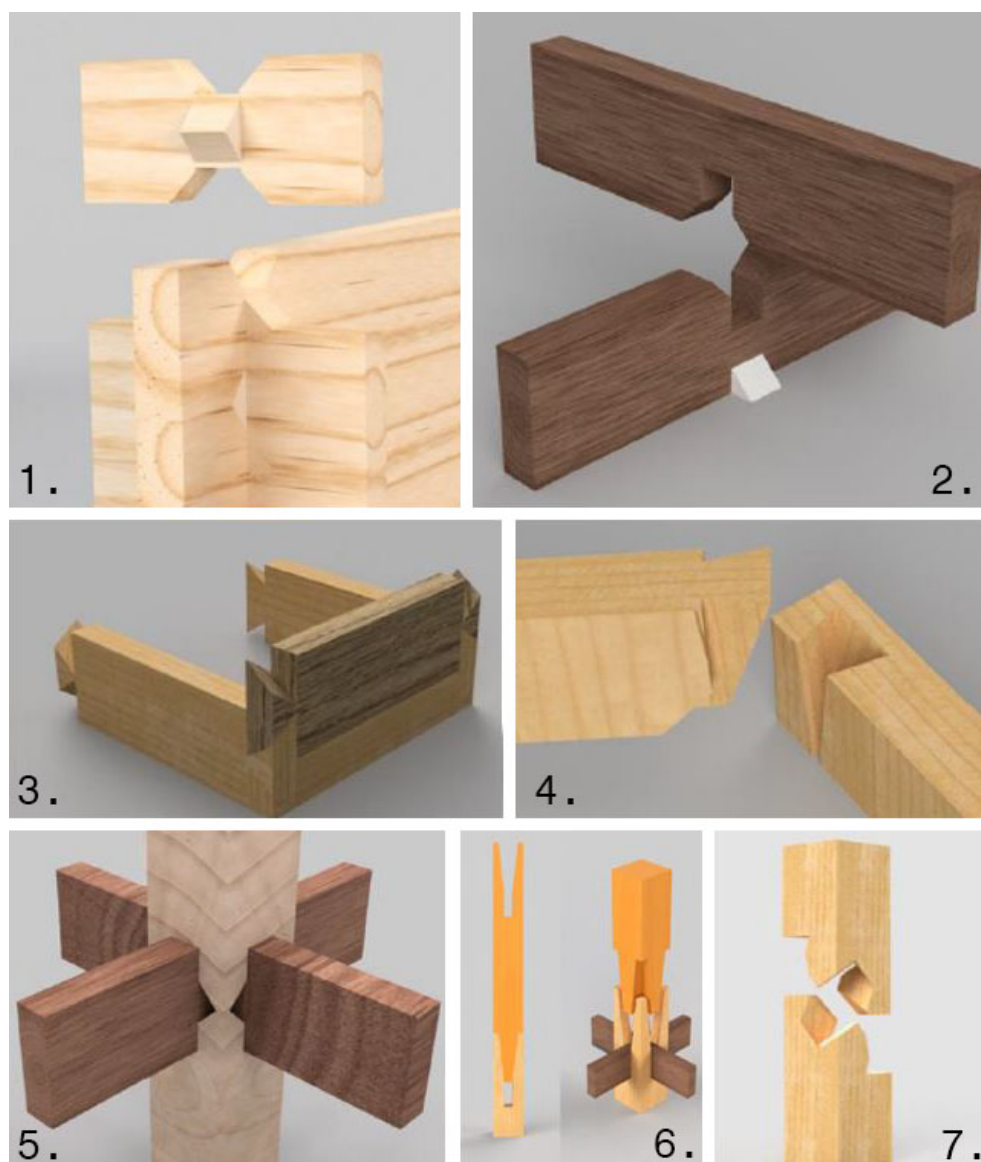


FIGURE 3.8 – 1. et 2. assemblage à mi-bois / 3. et 4. queues d'arondes / 5. jonction de 2 colonnes / 6. tenon et mortaise / 7. "kawai tsugite" drone-compatible
C.Manderlier et T. de Furstenberg (2017).

5. Certaines sociétés, comme la firme japonaise Prodrone, produisent toutefois déjà des drones équipés de bras robotisés. Il est donc fort probable que ces machines volantes soient capables de réaliser des tâches de plus en plus sophistiquées.

Les essais menés avec un pilote ont montré la faisabilité d'empiler des poutres en bois à l'aide d'un drone. Le système de préhension inspiré des plats métalliques utilisés pour les éléments en béton nécessite cependant d'être repensé pour le bois (voir chapitre 6, section 1). Les tests ont également mis en évidence que le vent provoqué par les hélices du drone peut provoquer le basculement des poutres testées. Ce phénomène est à prendre en compte pour la conception d'un nouveau système.

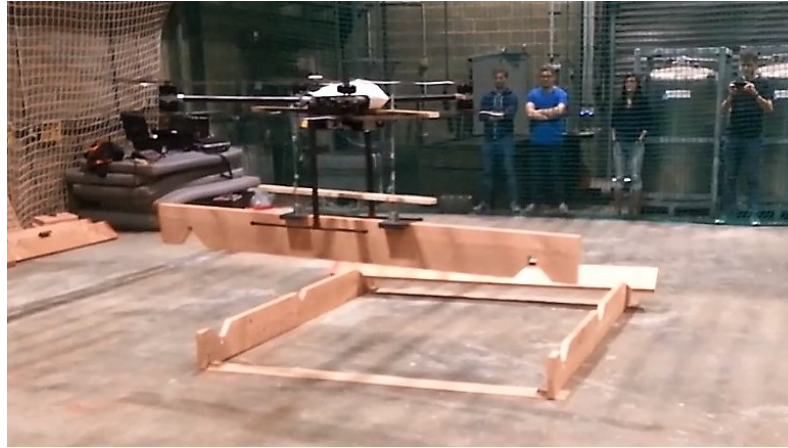


FIGURE 3.9 – Essai d'empilement mené avec un pilote à la Drone Zone de l'UCL.

STRUCTURES PAR EMPILEMENT

4.1 Systèmes constructifs

En Europe, les 4 systèmes constructifs en bois les plus répandus sont :

- l'ossature bois ;
- le système poteaux-poutres ;
- les panneaux en bois massif ;
- l'empilement de madriers.

L'ossature bois est le système le plus utilisé en Belgique¹. Il s'agit d'assembler une structure portante formée de montants espacés de 40 à 60 cm et contreventée par un panneautage. Un tel assemblage ne peut être réalisé par un drone à cause de l'impossibilité actuelle de visser/clouer depuis les airs. Ces panneaux pourraient néanmoins être préfabriqués en usine et transportés sur chantier. Mais le poids et le volume important des éléments rendrait l'usage d'une grue plus judicieux que l'utilisation de drones.

Il en va de même, pour les panneaux en bois massif qui sont très difficilement transportables par voie aérienne en raison de leur poids encore plus important. La nécessité d'utiliser des éléments plus légers est la raison pour laquelle le précédent mémoire sur le sujet s'est intéressé plutôt aux assemblages liés aux systèmes poteaux-poutres et aux structures par empilement.

Deux grands axes de recherche ont été dégagés à partir de ces deux derniers modes constructifs et des travaux de recherches précédents. Le premier s'intéresse à la possibilité de développer des modules légers et compacts similaires aux briques de maçonnerie drone-compatible. Il est possible de s'inspirer de produits existants comme les briques de bois produites par la société Steko® en Suisse depuis 1997, ou encore par une start-up française, Brikawood, active depuis 2016. Un travail similaire à celui effectué sur les assemblages traditionnels japonais pourrait permettre d'adapter ces briques de bois à la construction par drone.



FIGURE 4.1 – Briques de bois de Steko (à gauche) et de Brikawood (à droite)

1. 84% des constructions neuves en bois en 2016 (source : houtinfoois).

Le second axe de recherche explore la conception de structures à base d'éléments plus longs, de type « poutre » ou « panneau ». L'objectif est de pouvoir réaliser des portées plus importantes qu'avec les systèmes de maçonnerie. Ces typologies structurales de plus grande envergure font l'objet du présent mémoire, car leur échelle permet de mettre en avant l'intérêt des drones et du paramétrique pour la construction bois.

4.2 Empilement paramétrique

Les essais réalisés, à la Drone Zone, dans le cadre du précédent mémoire, ont montré la faisabilité d'empiler deux poutres en bois l'une sur l'autre avec un drone piloté manuellement. Les typologies structurales présentées dans cette section explorent les possibilités architecturales de l'empilement paramétrique. Elles ont été générées avec Rhinoceros 3D² et le plug-in Grasshopper³. Un algorithme a été conçu pour créer différentes itérations de piles en faisant varier la position des poutres les unes par rapport aux autres un peu à la manière d'un jeu de KaplaTM.

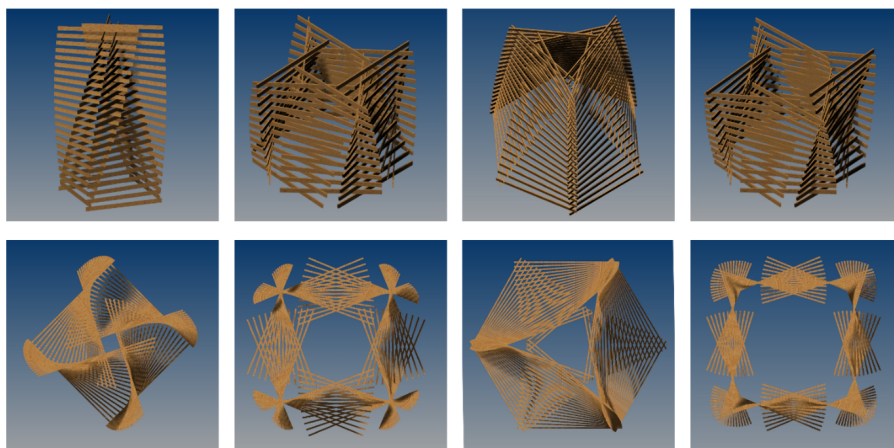


FIGURE 4.2 – Différentes itérations de structures en bois empilées

La position de chaque poutre par rapport à un point fixe arbitraire dans l'espace est donnée par le code informatique et permet une traduction directe en instructions de vol pour le(s) drone(s). L'intérêt du drone dans ce cas précis est qu'il permet une construction beaucoup plus rapide qu'avec des moyens classiques car les géométries sont complexes. Il aurait en effet été nécessaire de prendre de nombreux points de repère pour parvenir à assembler la structure de façon aussi précise.

Ici, les éléments sont simplement empilés sans connexion. Néanmoins, il est possible de réaliser un assemblage unique pour chaque intersection de poutres. Cela impliquerait de développer l'algorithme précédent pour concevoir ces assemblages en fonction des angles et positions des poutres les unes par rapport aux autres. La conception paramétrique des éléments combinée à une machine CNC permettrait ainsi de produire en série de nombreuses connexions différentes. En ordonnant le stockage des poutres et en partageant cette information avec l'algorithme, il est ensuite possible d'automatiser entièrement le montage.

2. Logiciel de Conception Assistée par Ordinateur permettant de réaliser des surfaces complexes à partir de la théorie des NURBS (Non-Uniform Rational Basis Spline).

3. Logiciel de programmation visuel utilisé pour développer des algorithmes génétiques permettant de modéliser des projets architecturaux de façon paramétrique. Grasshopper utilise l'interface de Rhinoceros 3D pour générer ses rendus.

GRILLE DE PANNEAUX ENTRECROISÉS

5.1 Panneaux de bois

L'utilisation de panneaux de bois à la place de poutres permet d'atteindre des portées plus grandes pour un même poids en réduisant la largeur des sections. En outre, les panneaux peuvent être découpés plus facilement grâce à leur épaisseur réduite. Ils offrent par conséquent la possibilité de travailler avec des éléments à géométrie variable ou courbe.

Plusieurs types de panneaux sont produits par l'industrie parmi lesquels :

- Le MDF/HDF (Medium/High Density Fiberboard), un panneau de fibre principalement utilisé pour le mobilier ou la décoration d'intérieur. Il offre peu d'applications structurelles et réagit très mal à l'humidité.
- L'OSB (Oriented Strand Board), un panneau à copeaux orientés qui peut être utilisé comme contreventement pour les murs, les toits et les planchers.
- Le CLT (Cross-laminated timber), un panneau de bois lamellé-croisé, composé d'au moins 3 couches de bois massif collées perpendiculairement. Il peut être utilisé dans les planchers et les murs porteurs.
- Le LVL (Laminated Veneer Lumber) ou Lamibois, un panneau constitué de couches de placage de bois. Il offre une grande résistance mécanique et permet la fabrication de gros éléments à haute stabilité dimensionnelle.

En raison de leur trop grande sensibilité à l'humidité, le MDF et l'OSB ne peuvent être envisagés pour construire des structures suffisamment durables. Par ailleurs, les panneaux de CLT, bien que très résistants, ont une épaisseur minimale de 60 mm (3 couches de 20 mm). L'objectif étant de diminuer au maximum la masse linéaire des éléments pour augmenter les portées, les panneaux de CLT sont difficilement compatibles avec la construction par drone. Par conséquent, les panneaux de LVL sont le choix le plus approprié pour cette recherche, car ils sont disponibles avec des épaisseurs comprises entre 21 et 75 mm, tout en étant très résistants et peu sensibles à l'humidité.

Structures gaufrées¹

Une source d'inspiration pour cette recherche peut être le Metropol Parasol à Séville, qui est composé d'une multitude de panneaux de LVL indépendants reliés par des fils métalliques.

1. Dans la littérature anglo-saxonne, le terme "Waffle Structure" désigne un type de structure en nid d'abeille dont les cellules sont rectangulaires au lieu d'être hexagonales.

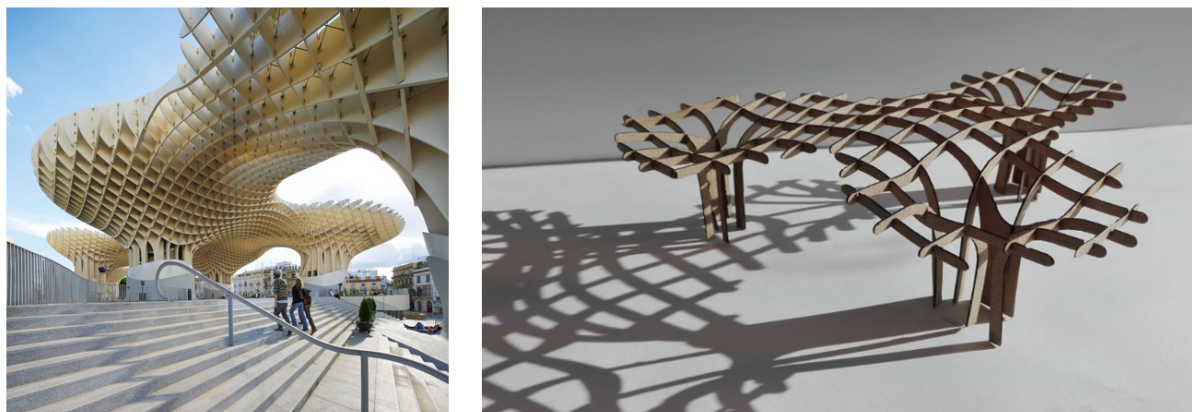


FIGURE 5.1 – Étude d'une structure en grille inspirée par le Metropol Parasol à Séville
(Photo de gauche : A. S. Branders)

Ce concept peut être étendu à une grille de panneaux emboîtés les uns dans les autres, comme sur la figure 5.1 à droite. L'avantage d'entrecroiser les panneaux est que cela permet de réduire le déversement inhérent aux éléments longs de faible épaisseur. L'utilisation d'une multitude d'éléments minces est un atout majeur pour la construction par drone, car elle peut conduire à une grande variété de formes architecturales et structurelles (figure 5.2).



FIGURE 5.2 – Les ailes du temps, Thierry Bontridder
(Aéroport national de Zaventem, 2004)

Ces structures « gaufrées » trouvent leur application depuis une quinzaine d'années dans la réalisation de sculptures, de mobiliers ou encore d'objets de décoration. Cette typologie permet de réaliser des formes organiques complexes tout en employant un procédé simple et économique. Il existe cependant très peu d'exemples à l'échelle architecturale car le comportement mécanique d'une grille de panneaux de bois emboîtés les uns dans les autres n'a pas encore été suffisamment caractérisé. Néanmoins la rigidité de ce genre de système est assez élevée.

Les exemples ci-dessous illustrent le potentiel des structures gauffrées. Avec des feuilles de carton de quelques millimètres seulement, il est possible de créer du mobilier capable de reprendre le poids d'un être humain (figure 5.3). En outre, des formes élégantes peuvent être obtenues avec quelques éléments plans, faciles à manipuler (figure 5.4).



FIGURE 5.3 – "Chick-n-Egg", Responsive Design Studio (2015)



FIGURE 5.4 – Pavillon pour le Festival des Architectures Vives de Montpellier, Robin Juzon (2013)

5.2 Assemblage à mi-bois

Parmi les assemblages en bois drones-compatibles adaptés dans le mémoire précédent, la queue d'aronde et l'assemblage à mi-bois sont les seuls à permettre le croisement de deux poutres.

Le tableau 5.1 montre les atouts de l'assemblage à mi-bois par rapport à la queue d'aronde. La possibilité de le découper d'un seul trait en suivant une courbe plane est un avantage non négligeable. Cela permet de les produire en série, de façon industrialisée, sans augmenter le coup de fabrication globale de la structure. Dans le cadre de cette recherche, l'assemblage à mi-bois est donc le plus adapté pour réaliser des structures complexes avec des panneaux de LVL.

	Assemblage à mi-bois	Queue d'aronde
Dimensions minimales	15cm	15,5cm
Fabrication	Découpage plan	Fraisage tridimensionnel
Perte de matière	50% de la hauteur de la section au niveau de l'encoche	Diminution importante en hauteur et en largeur

TABLE 5.1 – Deux assemblages drones-compatibles permettant le croisement de deux poutres

Plusieurs variantes de l'assemblage à mi-bois ont été imaginées pour cette recherche. Elles ont ensuite été testées avec une précision de positionnement du drone fixée à 5 cm autour d'un point fixe théorique au centre des articulations. Les tests réalisés dans le mémoire précédent ont permis d'établir que la pente nécessaire au glissement de 2 pièces de bois l'une sur l'autre devait être fixée à 35 degrés.

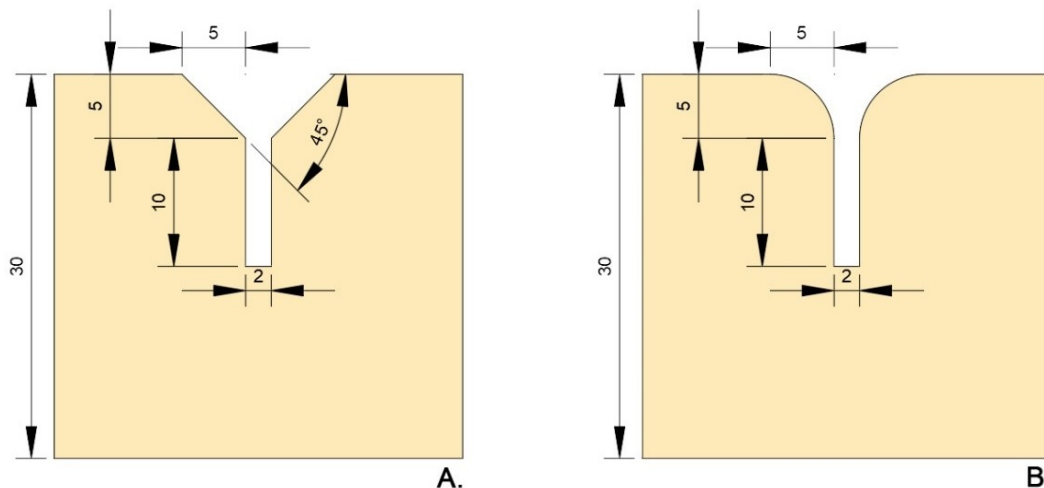


FIGURE 5.5 – Deux variantes de l'assemblage à mi-bois (dimensions en cm)

Avec l'assemblage de type A (voir figure 5.5), les pièces tendent à buter contre le coin formé par l'ouverture évasée et l'entaille verticale (figure 5.7/gauche). Une ouverture arrondie comme celle du type B permet d'éviter ce problème. Cependant, la tolérance est alors réduite par rapport à l'imprécision du drone car les pentes diminuent jusque 0° sur les bords de l'assemblage. Cela peut empêcher le glissement des deux pièces l'une dans l'autre si la pièce supérieure est lâchée dans la zone où la pente est trop faible.

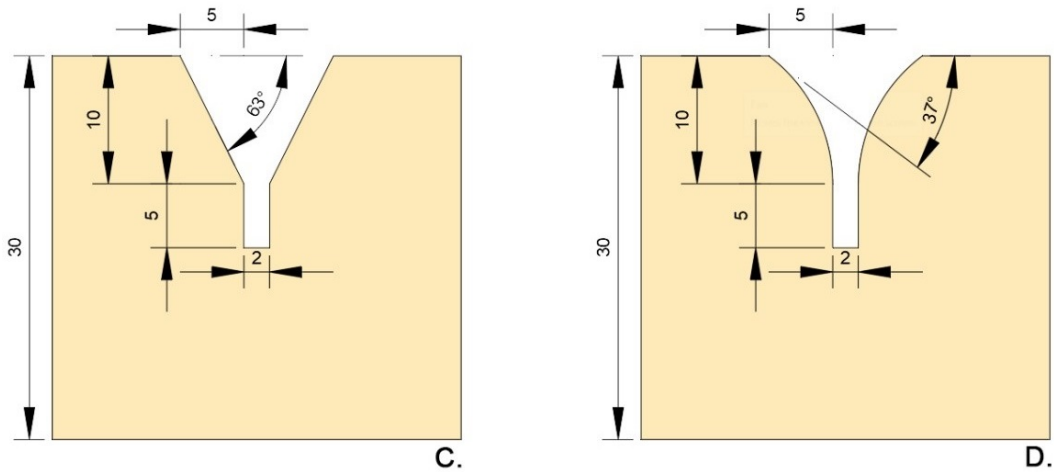


FIGURE 5.6 – Deux autres variantes de l’assemblage à mi-bois (dimensions en cm)

L’assemblage de type C (voir figure 5.6) est une amélioration du type A, mais le même inconvénient apparaît, même s’il est beaucoup moins fréquent. De plus, l’encoche étant plus petite, cela rend la connexion moins rigide. L’assemblage de type D combine les avantages, sans les inconvénients, des précédents. Il maintient une tolérance de 5 cm avec un angle minimum de 37° aux extrémités, ce qui est suffisant pour assurer le glissement entre les deux panneaux.

Enfin, plusieurs connexions peuvent être assemblées en même temps avec des assemblages de type D (figure 5.7/droite). Comme la stabilité angulaire des drones utilisés à l’UCL est nettement supérieure à la précision de leur positionnement cardinal, les encoches les plus éloignées des drones bénéficient encore d’une précision d’environ 5 cm. Néanmoins pour des éléments très longs, la difficulté d’aligner toutes les encoches les unes en face des autres ne sera pas négligeable.

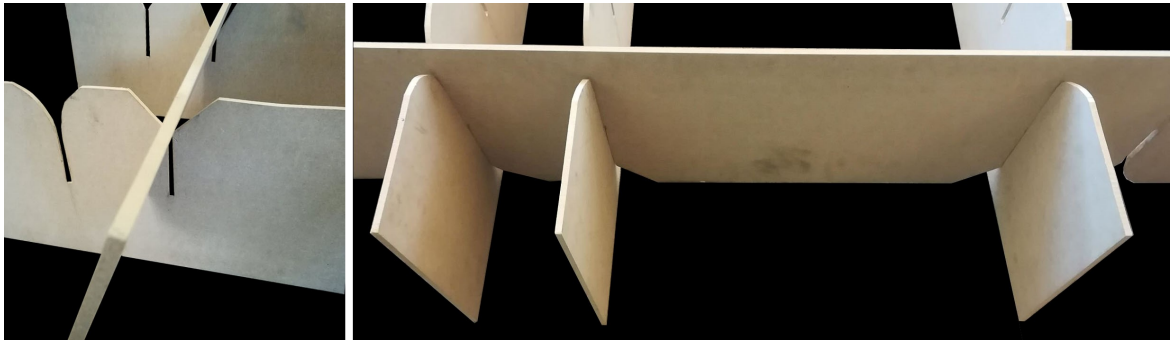


FIGURE 5.7 – Assemblage de type A (à gauche), connexion multiple de type D (à droite)

5.3 Code Grasshopper

Afin d’explorer les possibilités architecturales de ces structures en grille, un nouveau code informatique a été développé sur Grasshopper en intégrant les contraintes liées aux panneaux et aux assemblages. Les différentes étapes du canevas², disponible en annexe, sont présentées ci-dessous. Les interactions avec le modèle paramétrique peuvent se faire soit en modifiant les objets géométriques dans Rhinoceros 3D, soit en ajustant les paramètres numériques dans Grasshopper.

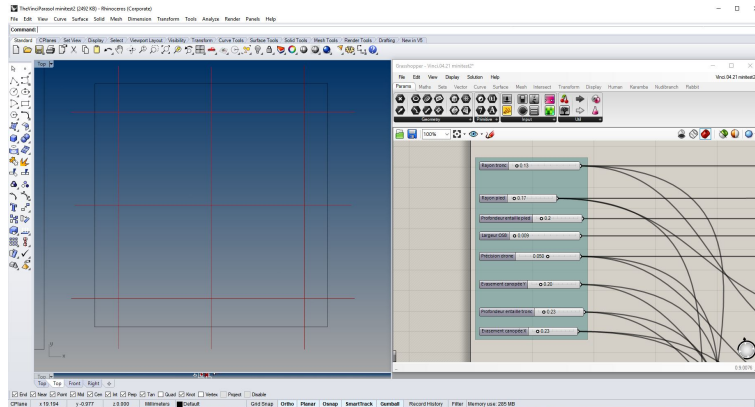


FIGURE 5.8 – L’interface de Rhinoceros 3D (à gauche), le canevas Grasshopper (à droite)

La première étape est de choisir l’implantation de la structure. Le périmètre est d’abord dessiné avec Rhino, puis transformé en grille grâce au code Grasshopper (figure 5.9/1). La grille est ensuite projetée contre une surface NURBS³ dont la forme peut être modifiée en déplaçant ses points de contrôle (5.9/2). Ceci permet de générer, grâce au code Grasshopper, une grille de poutres⁴ 2D (5.9/3), dont la géométrie peut être modifiée graphiquement en ne déplaçant que quelques points. A ce stade du processus, un premier aperçu de la structure est créé, et de nombreuses possibilités architecturales différentes peuvent déjà être explorées.

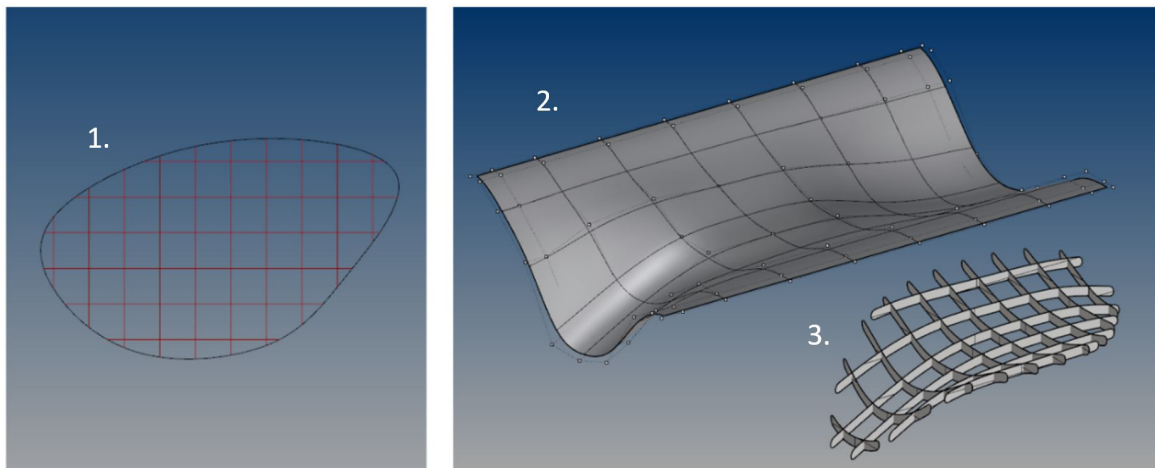


FIGURE 5.9 – Première étape : la création de la grille de poutres courbes

2. Un code développé avec Grasshopper se présente sous la forme d’un canevas sur lequel sont disposées des batteries capables de réaliser des opérations et pouvant être connectées entre-elles.
3. Une surface NURBS est définie par des noeuds et des points de contrôle. Il s’agit d’une généralisation des B-Splines permettant de représenter efficacement des surfaces courbes à partir d’un réseau de contrôle.
4. à partir de cette section, le terme "poutre" désigne les panneaux orientés horizontalement et le terme "colonne" les appuis constitués de panneaux orientés verticalement.

L'étape suivante concerne l'intégration des assemblages à mi-bois de type D à chaque intersection de poutres (figure 5.10/droite). Il est pour cela nécessaire de déterminer au préalable l'ordre dans lequel les poutres seront assemblées⁵, car cela a un impact direct sur l'orientation des encoches. La géométrie de l'assemblage à mi-bois intégré au code peut être ajustée en fonction de l'épaisseur des panneaux et de la précision du drone.

Par soucis d'homogénéité, les appuis (figure 5.10/gauche) de la structure utilisent le même type d'assemblage. La forme des pièces est régie par plusieurs paramètres. Le sommet des "colonnes" s'adapte automatiquement à la courbure des poutres qui reposent sur elles. La hauteur totale de l'appui est fonction de la hauteur locale de la grille à cet endroit.

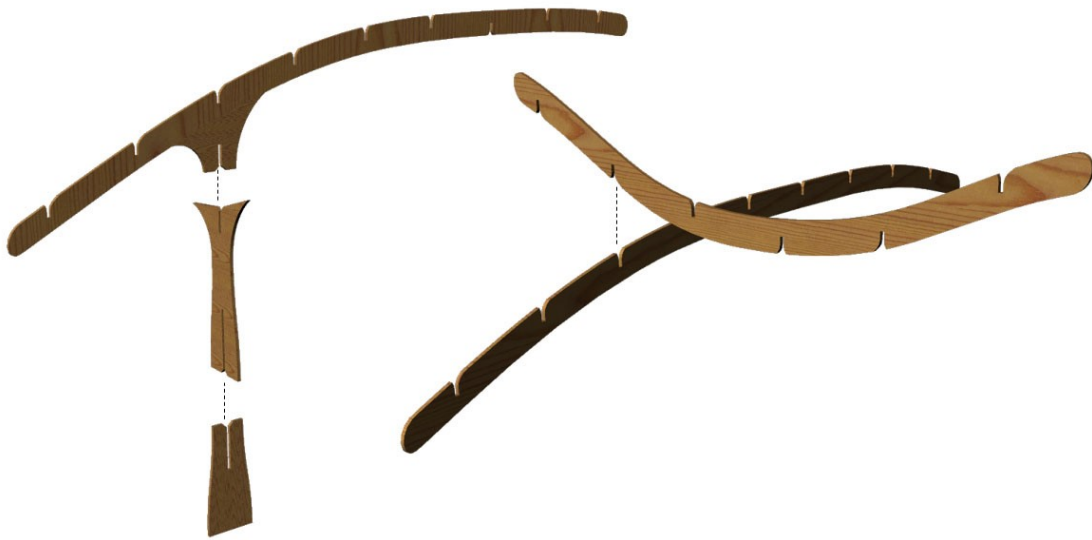


FIGURE 5.10 – Deuxième étape : la génération paramétrée des assemblages

La troisième étape est la mise à plat des pièces afin d'exporter un fichier d'instructions pour le découpage des pièces (figure 5.11). L'intérêt de cette méthode est que la construction du modèle réel suit exactement le même procédé que celui de la maquette. La seule différence étant l'outil utilisé pour découper les pièces. Une fraiseuse à bois à commande numérique étant nécessaire pour découper des pièces en bois de plusieurs centimètres d'épaisseur, tandis qu'une découpeuse laser suffit pour réaliser un modèle à plus petit échelle.

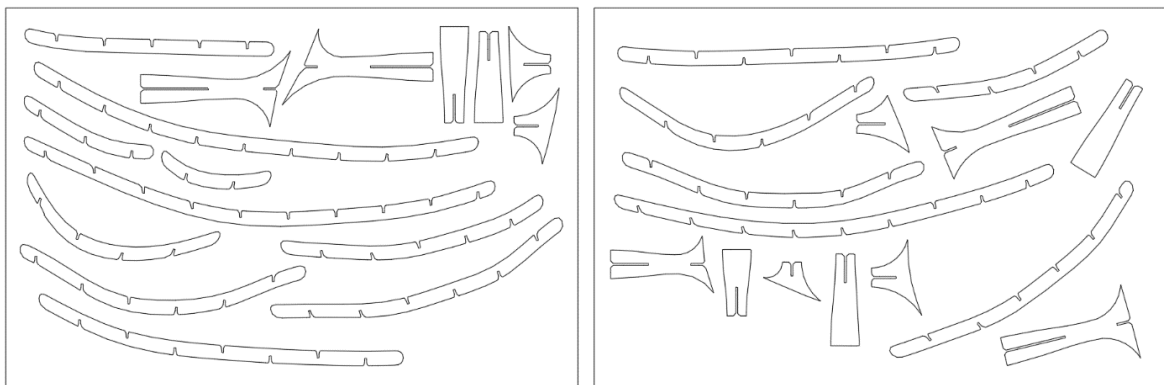


FIGURE 5.11 – Dernière étape : la création du fichier de découpe

5. Voir Chapitre 6 : Séquence de montage

En dernier lieu, un rendu 3D de la structure est également réalisé à chaque essai, ce qui permet de tester de nombreuses géométries avant la construction définitive (figure 5.12).

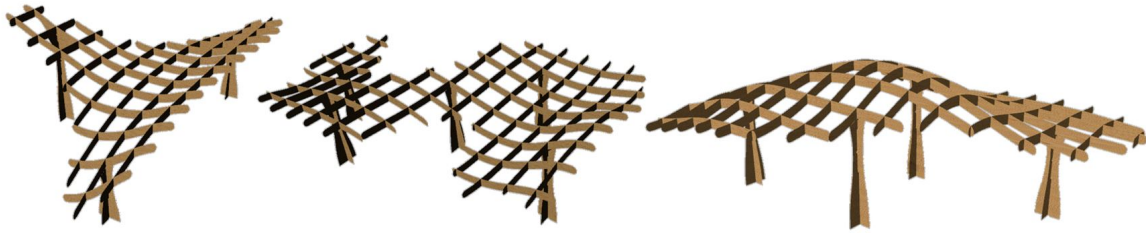


FIGURE 5.12 – Itérations multiples générées par l’algorithme

La structure de la figure 5.13 servira d’exemple pour illustrer les chapitres 5 et 6 qui traitent de la mise en oeuvre et le comportement statique du système développé dans ce mémoire.



FIGURE 5.13 – Rendu du modèle 3D dans la cour du bâtiment Vinci (Université catholique de Louvain, Belgique)

MONTAGE DE LA STRUCTURE

6.1 Séquence de montage

La réalisation de la structure peut être décomposée en quatre étapes :

- Les fondations
- Les colonnes
- La grille
- La couverture (optionnelle)

L'objectif de ce mémoire étant de développer un système structural drone-compatible en bois, il s'agit principalement de détailler, dans cette section, la mise en œuvre des panneaux de bois formant les colonnes et la grille de poutres.

Les fondations et la présence éventuelle d'une couverture par dessus la structure sont évoquées car intrinsèquement liées à l'approche globale visée par l'intégration des différents composants au sein d'un même code paramétrique. Toutefois, leur nature exacte dépend, logiquement, du site d'implantation de la structure (composition du sol, climat) et du programme.

Les fondations

Il n'est pas nécessaire d'ancrer la structure dans le sol pour qu'elle soit stable. Le nombre de colonnes, leur disposition et la position du centre de gravité de la grille peuvent être adaptés pour assurer l'équilibre de la structure. Néanmoins, il peut être intéressant de la fixer au sol pour diverses raisons pratiques. Ancrer les appuis facilite notamment la mise en place des panneaux avec un drone.

Par ailleurs, le bois étant particulièrement sensible à l'humidité, il est nécessaire d'éviter tout contact entre les panneaux de bois et le sol pour éviter les risques de moisissure dans les panneaux. Une semelle dans un autre matériau doit donc être prévue. Un pied de poteau en acier fixé dans un socle en béton est la solution la plus communément adoptée pour ce type de connexion ¹.

Pour les calculs de résistance développés dans le Chapitre 7, nous considérons un ancrage composé de 8 équerres métalliques boulonnées à travers les panneaux.

1. Bien que la construction d'une structure entièrement en bois présente des atouts esthétiques et écologiques non-négligeables, il pourrait être envisagé de réaliser les colonnes dans un autre matériau moins sensible à l'humidité (par exemple en acier inoxydable) pour éviter les problèmes d'infiltrations dans le bois au niveau de l'interface avec les fondations.

Les colonnes

Dans l'optique où les différents appuis de la structure seraient ancrés dans le sol à l'aide de fondations, les colonnes devraient être assemblées à partir du sol à la main. En effet, il n'existe pour l'instant aucun système de fondation drone-compatible qui permettrait de fixer les colonnes de bois de la structure dans le sol avec un drone.

Par ailleurs, le faible poids des éléments composant chaque colonne facilite leur manutention et rend superflu l'utilisation de drones dans un contexte où le sol serait dégagé et accessible. L'emploi d'un drone pour soulever les longs et lourds panneaux de bois formant la structure de la grille est, par contre, beaucoup plus justifié.

La grille

L'ordre dans lequel les poutres doivent être placées pour assurer l'équilibre de la structure à chaque étape de la construction nécessite une attention particulière. Deux approches peuvent être employées. Dans un premier temps, il est possible d'établir un raisonnement logique et d'énoncer quelques règles permettant de déterminer une séquence de montage stable. Dans un second temps, une méthode plus rigoureuse peut être développée en effectuant une descente de charge poutre par poutre.

L'approche par raisonnement logique a été utilisée pour déterminer la séquence de montage de la structure représentée sur la figure 5.13. La première étape est la mise en place des colonnes de la structure. Minimum trois appuis sont nécessaires, ici, leur nombre a été porté à cinq pour des raisons esthétiques mais aussi pour assurer une plus grande stabilité à la structure. Au moins deux appuis doivent être alignés pour pouvoir poser la première poutre. Les poutres suivantes peuvent reposer soit sur deux appuis soit sur un appui et une des poutres précédentes (figure 6.1).



FIGURE 6.1 – Première étape du montage

L'objectif est de former le plus grand rectangle possible avec les poutres qui reposent directement sur un appui. En effet, plus la base initiale de la structure est large, plus la structure est stable. Des considérations esthétiques et programmatiques peuvent toutefois dicter la position des colonnes.

Dans le cas particulier présenté ici, les appuis ont été volontairement écartés des bords pour donner l'impression d'une canopée et un espace a été dégagé pour permettre d'entreposer une table au milieu.

L'étape suivante consiste à compléter le maillage de la grille en partant du centre vers les bords et en évitant de placer deux poutres de suite du même côté. Quelques exceptions à cette règle générale peuvent toutefois apparaître en fonction de la géométrie de la structure.

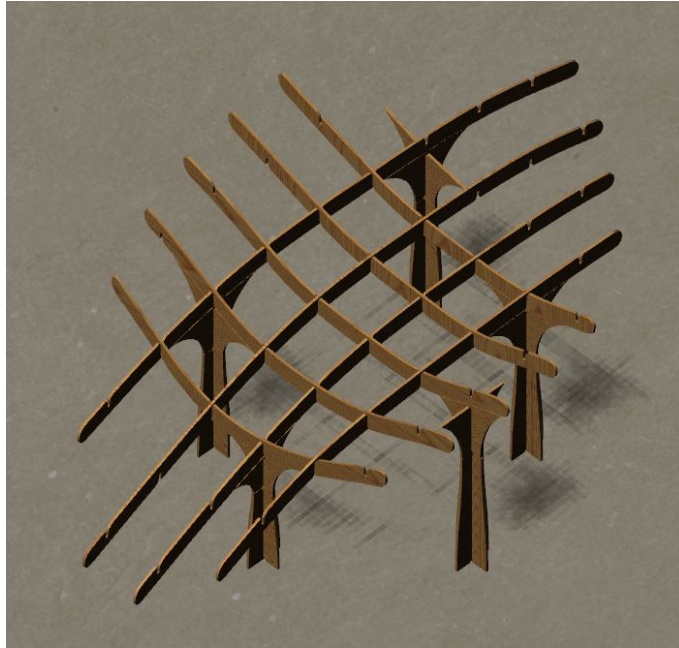


FIGURE 6.2 – Remplissage en partant du centre vers les extrémités

Afin de répartir au maximum les efforts à l'ensemble du système, il est également conseillé d'alterner autant que possible la direction des poutres posées en plaçant à chaque fois une poutre perpendiculaire à la précédente. Ce principe s'inspire du raisonnement utilisé pour la structure du Centre Pompidou à Metz² dont les portées atteignent jusqu'à 40 mètres. Cela permet à la grille de former un système rigide.

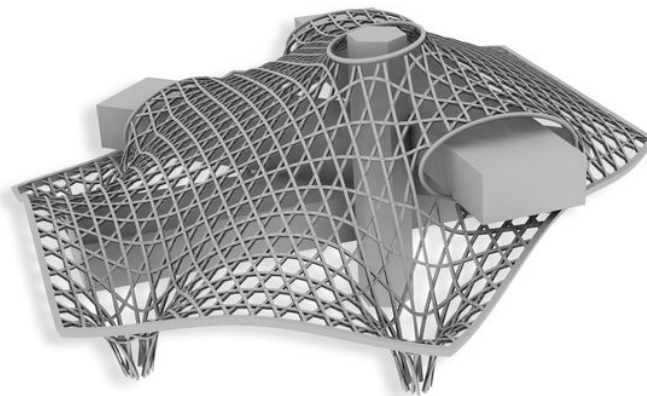


FIGURE 6.3 – Structure du centre Pompidou à Metz, Shigeru Ban (2010)

2. L'architecte, Shigeru Ban, aurait lui-même été inspiré des chapeaux traditionnels chinois réalisés à partir d'un entrelac de paille tressée.

La seconde approche consiste à vérifier l'équilibre de la structure de façon itérative. En effet, il est théoriquement possible de créer un algorithme évolutif capable de tester pour chaque étape, l'ensemble des poutres et de déterminer la meilleure combinaison possible pour la stabilité de la structure. Néanmoins, le nombre de possibilités étant un nombre factoriel (Pour 16 poutres, cela donne déjà plus de 20 mille milliards de possibilités³), le temps de calcul requis peut s'avérer très conséquent, même pour un ordinateur performant.

Dès lors, l'approche intuitive couplée à une vérification par calcul (détaillée au chapitre 7) s'avère être une solution plus rationnelle. Il est possible de programmer les règles énoncées afin de réduire le nombre de possibilités à tester. Dans l'optique de réaliser cette optimisation, il sera ensuite nécessaire d'intégrer au code Grasshopper un module capable d'effectuer les calculs de vérification.

Couverture

Dans le cas d'une structure prévue pour couvrir un espace des intempéries. Deux possibilités ont été envisagées. Une méthode relativement simple et économique consisterait à recouvrir la grille avec une toile capable d'épouser la forme organique des structures développées avec le code paramétrique. Une membrane en PVC similaire à celle déployée par dessus le pavillon du Japon à l'exposition universelle d'Hanovre en 2000 (figure 6.4) pourrait ainsi parfaitement convenir. Par ailleurs, il serait aisé d'extraire le patron de la toile depuis Grasshopper⁴.



FIGURE 6.4 – Pavillon du Japon, Otto Frei et Shigeru Ban (2000)

Une autre possibilité serait de trianguler⁵ la couverture de la structure à l'aide de panneaux rigides dont les dimensions pourraient également être obtenues par le code en fonction de la courbure de la structure. Cette solution présente l'avantage de former un recouvrement solide permettant de contreventer la structure. Toutefois, la lumière est alors totalement obstruée par les panneaux. Des questions d'étanchéité devraient également être résolues pour éviter que l'eau ne s'infilte dans les joints. Il pourrait donc être intéressant de combiner les deux systèmes pour bénéficier des avantages de chacun.

3. Pour le nombre exact : $16! = 20\,922\,789\,888\,000$

4. Certains modules spécialisés, comme "Panneling Tool" (créé par Rajaa Issa), peuvent être intégrés à Grasshopper pour déduire le patron nécessaire à la fabrication d'une toile tridimensionnelle.

5. Dans le cas d'une structure à simple courbure, des panneaux rectangulaires pourraient être utilisés pour couvrir l'intervalle entre les poutres mais avec une double courbure, la triangulation est nécessaire, deux triangles assemblés permettent de compléter chaque "case" de la grille.

6.2 Système de préhension

Le système de préhension est le mécanisme qui permet au drone de prendre un élément depuis la zone où les pièces sont entreposées, de le transporter et ensuite de le placer à la position établie numériquement par l'algorithme.

6.2.1 Système de préhension à aimant

Plusieurs systèmes utilisant des aimants électro-permanents ont été développés dans le cadre des recherches précédentes pour réaliser les tests d'emboîtement à la Drone Zone.

Comme expliqué dans le mémoire de Jean-François Leboutte et Vincent Parisel intitulé : "Développement d'un système constructif "drone-compatible" pour la construction de maisons unifamiliales en maçonnerie et en béton" [13], ces aimants sont très économes en terme d'énergie puisqu'ils présentent l'avantage de ne puiser dans la batterie du drone qu'au moment de lâcher la pièce. L'aimant électro-permanent produit constamment un champ magnétique. Lorsqu'un courant électrique parcourt la bobine qui l'entoure, un champ magnétique opposé, en sens et en intensité, est produit et annule sa capacité d'aimantation.

L'inconvénient de ce système est qu'il requiert qu'une plaque métallique soit fixée à l'élément devant être transporté. Pour les cônes en béton, par exemple, cette plaque métallique peut être placée au sommet de l'élément au moment de couler le béton. (figure 6.5).

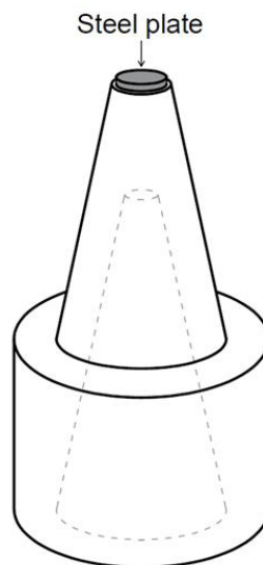


FIGURE 6.5 – Élément en béton muni d'une plaque métallique

Pour empiler les poutres en bois, une autre solution a du être envisagée par C. Manderlier et T. Furstenberg [12]. Il est possible d'adapter le système existant pour les maçonneries en fixant les plaques métalliques directement sur la tranche des poutres. Néanmoins, cette méthode s'avère peu esthétique car les plaques métalliques sont alors laissées apparentes sur la structure (figure 6.6).



FIGURE 6.6 – Poutre en bois munie de plaques métalliques

La faible épaisseur des panneaux de bois rend impossible la fixation de plats métalliques sur leur tranche. Une autre possibilité serait de percer des trous dans les panneaux pour pouvoir les soulever à l'aide de crochets fixés au drone. Cependant, une méthode non-destructive est préférable.

L'objectif est de développer un système de préhension qui ne requiert ni d'ajouter des éléments, ni d'enlever de la matière. Dans le cadre de ce mémoire, l'alternative proposée est d'utiliser un système à clapet ou à pinces capable de soulever les panneaux de bois sans modifier leur aspect.

6.2.2 Système de préhension à clapet

La première hypothèse retenue est d'utiliser les aimants électro-permanents pour concevoir un système de fermeture plutôt que de les utiliser en contact direct avec l'élément. Le principe consiste à insérer le panneau de bois entre les pattes du drone à l'aide de tiges de guidage dont la géométrie est semblable à celle des assemblages à mi-bois. Puis, d'utiliser un clapet composé de deux aimants pour bloquer (force attractive) ou lâcher (force répulsive) le panneau (figure 6.7).

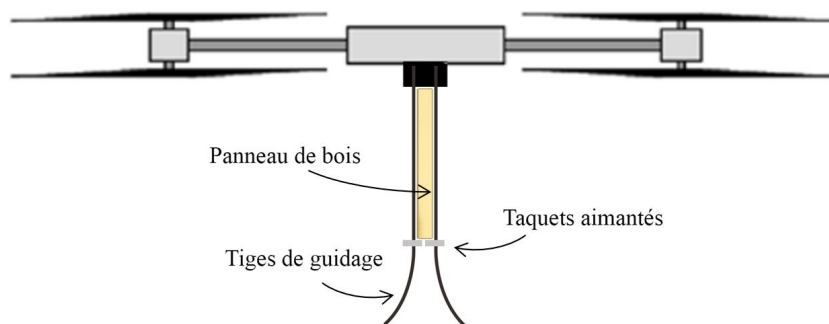


FIGURE 6.7 – Concept du système de préhension à clapet aimanté

L'inconvénient est que l'ajout d'un tel système en-dessous du drone empêche celui-ci de se poser. Il faut donc prévoir une station de décollage particulière d'où faire partir le drone. Par ailleurs, quelques réserves ont été émises quant à la stabilité du panneau de bois et à la précision pouvant être atteinte avec cette méthode de levage.

6.2.3 Système de préhension à pinces

Une autre possibilité est décrite par J.-F. Leboutte et V. Parisel. Il s'agit de saisir les panneaux avec des pinces fixées au drone.

Des pinces de levage (figure 6.8) ont été adaptées aux drones par A. Naveau et A. Moncourrier[14]. Le mécanisme particulier de la pince permet que le poids propre de l'élément participe à la force de serrage.



FIGURE 6.8 – Pince de levage adaptée aux blocs de maçonnerie drone-compatibles

Comme la pince entoure l'élément, ce système de préhension ne peut pas être employé pour placer les blocs de béton côte à côte. En effet, le bloc voisin fait alors obstacle à la pince. Le problème ne se pose pas pour les panneaux de bois puisqu'ils sont placés à 1m d'intervalle.

Afin d'éviter un déséquilibre du drone, les différents éléments de la grille doivent être saisis en un point proche de leur centre de gravité. Toutefois, ce point doit être suffisamment distant des encoches du panneau pour que la pince n'empêche pas l'emboîtement. Étant donné la précision requise pour assembler les panneaux, l'endroit exact doit être déterminé au préalable via le code pour que les coordonnées puissent être traduites en plan de vol pour le drone.

L'utilisation de deux pinces suffisamment écartées permettrait de se prémunir d'un éventuel basculement des pièces. Les calculs de dimensionnement suivants considèrent que la charge du panneau est répartie équitablement entre les deux pinces.

La charge q à reprendre en fonction de la longueur L des panneaux est ainsi donnée par l'équation :

$$q = \rho Lht \quad (6.1)$$

Où :

- $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$ est la masse volumique du LVL
- $h = 0,5 \text{ m}$ est la hauteur du panneau
- $t = 0,033 \text{ m}$ est son épaisseur

La force de serrage requise dans chaque pince pour retenir le panneau est donc la force totale divisée par deux :

$$F = \frac{\mu F_{frot}}{2} \quad (6.2)$$

Où :

- μ est le coefficient de frottement ⁶
- $F_{frot} = q.g$ avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

La dimension de la surface minimale, sur laquelle est appliquée cette force de serrage, est déterminée par la résistance caractéristique en compression du LVL ($f_{c,90,d} = 3,8 \text{ MPa}$ en surface perpendiculairement aux fibres). Comme il y a deux plaques par pince, cette surface doit être divisée par deux :

$$S = \frac{F}{2f_{c,90,d}} \quad (6.3)$$

La longueur des panneaux de la structure étudiée varie de 2 à 9m. Les dimensions des plaques requises sont données dans le tableau 6.1 pour le plus petit et le plus grand des panneaux de bois.

			Petit panneau			Grand panneau		
			μ_1	μ_2	μ_3	μ_1	μ_2	μ_3
Longueur du panneau	L	[m]	2	2	2	9	9	9
Masse à reprendre	m	[kg]	19,8	19,8	19,8	89,1	89,1	89,1
Force de frottement	F_{frot}	[kN]	0,10	0,10	0,10	0,44	0,44	0,44
Coefficient de frottement	μ	[/]	0,6	0,9	1	0,6	0,9	1
Force de serrage	F	[kN]	0,16	0,11	0,10	0,73	0,49	0,44
Résistance en compression	$f_{c,90,d}$	[MPa]	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
Surface de la pince	S	[m ²]	0,021	0,014	0,013	0,096	0,064	0,058
Largeur du carré	l	[m]	0,15	0,12	0,11	0,31	0,25	0,24

TABLE 6.1 – Calcul de la largeur d'une pince carrée pour différents μ et différents panneaux

Dès lors, pour des pinces lisses en métal, une surface carrée de 31cm de côté est requise pour soulever les panneaux les plus longs. L'ajout de caoutchouc ou de mords en acier permet d'augmenter l'adhérence, de diminuer la force de serrage requise et donc la dimension des plaques.

La taille des pièces nécessaires à la mise en oeuvre du système de préhension à pinces est importante. Toutefois, l'espacement des poutres autorise l'utilisation d'un mécanisme aussi volumineux.

6. La valeur du coefficient de frottement varie en fonction des interfaces considérées[15] :

- $\mu_1 = 0,6$ entre le bois et le métal
- $\mu_2 = 0,9$ entre le bois et le caoutchouc
- $\mu_3 = 1$ entre le bois et du métal (avec des mords)

Le poids du système, en revanche, est un inconvénient non-négligeable. Les pinces de serrage présentées plus haut pèsent 3.38kg chacune, ce à quoi il faut ajouter le poids du mécanisme de motorisation et les plaques de métal. Le poids total du système est estimé à une dizaine de kilos que le drone devra pouvoir porter en plus des panneaux.

6.3 Réalisation d'un test à échelle réduite

Un test à échelle réduite a été conduit dans le but de montrer le fonctionnement du système constructif (voir figure 6.11). La structure, d'environ un mètre cube, a été modélisée via Rhino et Grasshopper. Puis, le contour des différentes pièces a été extrait à l'aide du code paramétrique.



FIGURE 6.9 – Visualisation "éclatée" du modèle produit par le code paramétrique.

L'UCL ne dispose pas encore d'une fraiseuse à bois à commande numérique qui aurait permis de découper automatiquement les pièces dessinées, dans le panneau, à partir d'un fichier de découpe⁷. À l'aide d'un projecteur, le contour de chaque pièce a donc été décalqué au crayon sur des panneaux de MDF⁸ de 6mm d'épaisseur. (figure 6.10 à gauche).

La découpe des panneaux a ensuite été réalisée au LEMSC (Laboratoire Essais mécaniques, Structures et génie civil) avec une scie sauteuse (figure 6.10 à droite). Il était essentiel d'être suffisamment précis pour s'assurer que les assemblages allaient rester correctement alignés et permettre l'emboîtement des panneaux.



FIGURE 6.10 – Décalquage du fichier de découpe à l'aide d'un projecteur (à gauche) et découpage la scie sauteuse (à droite)

La structure a ensuite pu être assemblée, très rapidement, à la main⁹ (figure 6.11 sans qu'aucun outil supplémentaire ne soit nécessaire. La réalisation d'un test à petite échelle a permis de mettre en évidence autant la faisabilité du système constructif développé que la simplicité de sa mise en œuvre. L'automatisation du procédé pour une structure à grande échelle paraît donc tout à fait réalisable.



FIGURE 6.11 – Réalisation miniature de la typologie structurale développée dans ce mémoire

7. Un fichier de découpe est un fichier converti dans un format compatible avec une machine à commande numérique (.dxf, .svg ...) qui lui permet de transformer les géométries dessinées en un trajet à parcourir pour la foreuse ou le laser.

8. Panneaux légers composés de fines particules de bois. Ils présentent l'avantage d'être relativement faciles à découper. Bien qu'un test avec des panneaux de LVL serait nécessaire pour étudier le comportement structural du matériau, le MDF a permis de valider le fonctionnement des assemblages.

9. Un test à l'aide d'un drone est envisageable mais requiert encore la réalisation d'un système de préhension efficace.

CARACTÉRISATION MÉCANIQUE

L'étude du comportement mécanique des structures en grille développées grâce au code Grasshopper peut être approchée à travers l'analyse du cas particulier de la structure présentée sur la figure 5.13. Ce chapitre présente les calculs liés à la résistance des différents éléments de cette structure ainsi que l'étude de sa descente de charges. Ces analyses permettent de vérifier que la structure est bien dimensionnée.

Il est considéré que cette structure, conçue grâce à l'algorithme Grasshopper, est entièrement réalisée en LVL (Laminated Veneer Lumber)[16]. Ces panneaux de bois sont habituellement constitués de plusieurs couches de placage de bois dont les fibres sont orientées dans la même direction. Dans ce cas, le panneau est dit "à orientation parallèle". Cependant, il existe également des panneaux dit "à orientation perpendiculaire" constitués d'un placage à fils croisés. Dans la mesure où ce mode de fabrication est beaucoup moins fréquent, tous les calculs ont été réalisés en considérant que la structure était construite avec des panneaux dit "à orientation parallèle".

Les spécifications techniques de résistance des panneaux de LVL dit "à orientation parallèle" sont présentées dans le tableau suivant :

Caractéristique	Orientation		
Résistance en flexion	En surface	$f_{m,0,d}$	50,0 N/mm ²
	Le long du bord	$f_{m,0,d}$	48,0 N/mm ²
Resistance à la traction	Parralèlement à la fibre	$f_{t,0,d}$	36,0 N/mm ²
	Le long du bord, \perp à la fibre	$f_{t,90cd}$	0,9 N/mm ²
	En surface, \perp à la fibre	$f_{t,90cd}$	/
Resistance à la pression	Parralèlement à la fibre	$f_{c,0,d}$	40,0 N/mm ²
	Le long du bord, \perp à la fibre	$f_{c,90,d}$	7,5 N/mm ²
	En surface, \perp à la fibre	$f_{c,90,d}$	3,8 N/mm ²
Résistance au cisaillement	En surface	$f_{v,d}$	3,2 N/mm ²
	Le long du bord	$f_{v,d}$	4,6 N/mm ²

TABLE 7.1 – Propriétés de conception caractéristiques des panneaux de LVL¹

Dans le tableau ci-dessus, l'indice "d" signifie "design". Il indique que les coefficients de sécurité sont déjà appliqués et que, par conséquent, il ne faut plus les introduire lors des calculs.

1. EN 1995-1-1 (Eurocode 5) - Source : voir [17]

Les trois premières sections du chapitre sont consacrées aux calculs ayant trait à la résistance des colonnes porteuses à une charge verticale, à la résistance des assemblages à mi-bois et à la résistance des colonnes aux sollicitations latérales. La dernière section se concentre sur la descente de charges.

7.1 Résistance des colonnes porteuses

Pour déterminer la charge maximale que peuvent supporter les colonnes, il convient d'analyser la résistance à la compression avec et sans flambement.

Au préalable, il est nécessaire de déterminer quelle est la section à considérer pour calculer ces résistances, autrement dit, l'endroit le plus faible de la plus grande des colonnes porteuses. Comme la section des colonnes varie avec leur hauteur², la section retenue pour le calcul de la résistance correspond à la partie la plus étroite (dite "section minimale"). La structure analysée possède cinq colonnes de hauteurs différentes. La section considérée appartient à la plus haute des ces colonnes (H=3,5m) et est schématisée sur la figure 7.1.

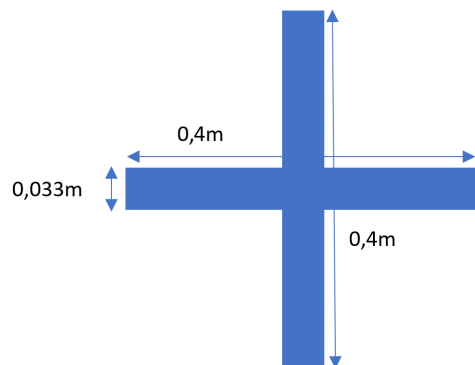


FIGURE 7.1 – Dimensions de la section minimale d'une colonne

7.1.1 Résistance à la compression

L'aire de la section représentée à la figure 7.1 vaut $A = 0,025m^2$.

La résistance à la compression est donnée par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{N_{max}}{A} \leq f_{c,0,d} \quad (7.1)$$

Avec $f_{c,0,d} = 40MPa$ (tableau 7.1 : résistance à la compression parallèlement aux fibres), on obtient une force de $N_{max} = 1012,5kN$.

Chaque colonne peut donc supporter une charge de 103 tonnes. Dans le cas de la structure examinée, la résistance en compression est loin d'être critique tant que la structure est uniquement soumise à son poids propre puisque la masse totale de la structure est de 575kg.

2. En raison de la forme organique des colonnes.

7.1.2 Résistance au flambement

Pour déterminer la force maximale N_{Ed} qui pourra s'appliquer sur la colonne porteuse (figure 7.2), les principales hypothèses ont été posées :

- Les panneaux A et B sont emboîtés l'un dans l'autre et sont analysés séparément.
- L'aire de la section minimale de chaque panneau est de $0,0132m^2$ et l'inertie de cette section est de $1,2 \cdot 10^{-6}m^4$. L'inertie considérée est celle selon l'axe faible.
- La longueur de flambement est $L_f = \frac{H}{2}$ avec $H = 3,5m$ (la hauteur de la plus haute des colonnes) car l'encoche où les panneaux s'emboîtent est considéré comme une rotule.

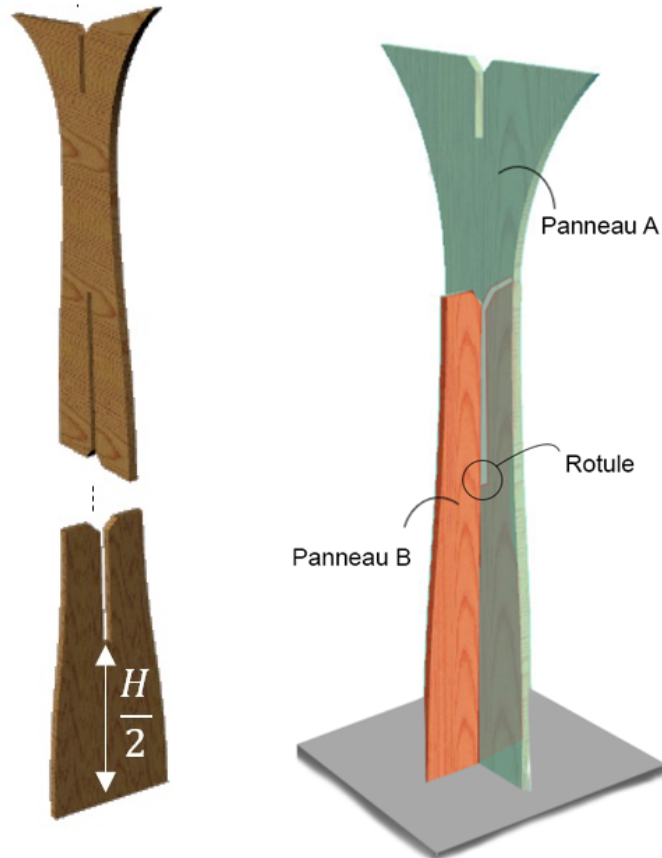


FIGURE 7.2 – Flambement d'une colonne

La résistance au flambement est donnée par :

$$\sigma_{c,0,Ed} = \frac{N_{Ed}}{A} \leq k_c f_{c,0,d} \quad (7.2)$$

N_{Ed} est la force maximale qui peut être appliquée sur un panneau. Elle peut être déterminée grâce

au système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} k_c = \frac{1}{k^2 + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \\ k = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2) \\ \lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\lambda_E} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{critique}}} \\ \beta_c = 0,2 \\ \sigma_{critique} = \frac{F_{critique}}{A} = \frac{\pi^2 E_{0,k} I}{L_f A} \end{array} \right. \quad (7.3)$$

Chaque panneau peut donc supporter une force de compression égale à 5,97kN. Dans la mesure où la structure est composée de 5 colonnes de deux panneaux, le poids propre maximum de la grille pouvant être repris par les appuis est de 6 tonnes pour le cas examiné.

Même en prenant en compte le flambement, le critère de compression n'est pas dépassé et la structure considérée est capable de reprendre la charge de 575kg due au poids propre de la grille.

7.2 Résistance de l'assemblage à mi-bois

Pour rappel, le seul type de connexion employé dans la structure est l'assemblage à mi-bois (voir section 5.2). Les différentes vérifications, ayant trait à cet assemblage particulier, abordées dans cette partie sont :

- La résistance en compression de l'encoche due au poids propre de la grille,
- La résistance de l'encoche à une force latérale
- La résistance de l'encoche à un couple pur

7.2.1 Résistance à un effort de compression dû à une force verticale

Les hypothèses sécuritaires suivantes ont été posées :

- La force est appliquée au fond de l'encoche sur l'aire représentée en rouge à la figure 7.3.
- Les frottements des parois latérales de l'encoche sont négligés

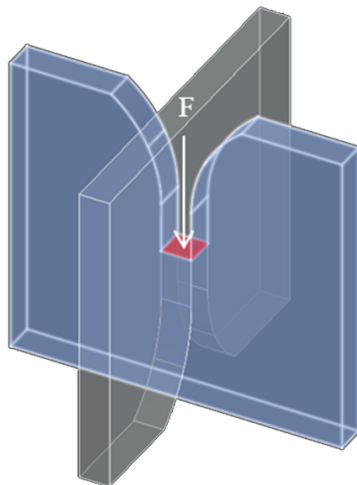


FIGURE 7.3 – Surface en compression

Pour une épaisseur de panneau $t = 0,033m$, l'aire représentée en rouge sur la figure 7.3 vaut $A = t^2 = 0,0011m^2$.

Le calcul suivant permet de vérifier la résistance de cette surface à la compression :

$$\sigma = \frac{N_{max}}{A} \leq f_{c,0,d} \quad (7.4)$$

Avec $f_{c,0,d} = 7,5MPa$ (tableau 7.1 : résistance en compression le long du bord, perpendiculairement aux fibres), on obtient une force de $N_{max} = 8,15kN$.

Avec des panneaux de 33 mm d'épaisseur, chaque encoche peut donc supporter 830,8kg. Le critère de résistance en compression est donc largement respecté puisque la masse totale de la structure est de 575kg.

7.2.2 Résistance à un effort de compression dû à une force latérale

Les hypothèses sécuritaires suivantes ont été posées :

- La force est appliquée à l'une des faces latérales de l'encoche sur l'aire représentée en rouge à la figure 7.4.
- Toute la pression exercée par le panneau perpendiculaire (représenté en gris) est rapportée sur la partie verticale de l'encoche. Aucun effort n'est transmis à la partie évasée.

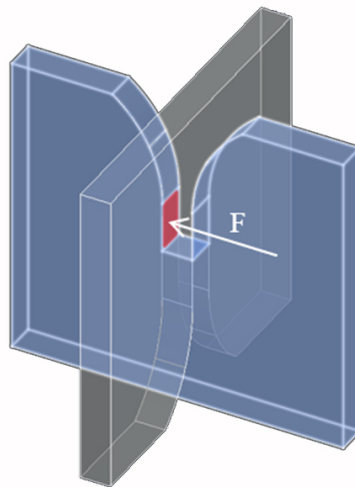


FIGURE 7.4 – Surface en compression

Avec une épaisseur de panneau $t = 0,033m$, l'aire représentée en rouge sur la figure 7.4 vaut $A = (\frac{h}{2} - 0,1).t = 0,00165m^2$.

La résistance de cette surface à la compression peut être calculée avec le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \sigma = \frac{N_{max}}{A} \leq f_{c,0,d} \text{ (panneau bleu)} \\ \sigma = \frac{N_{max}}{A} \leq f_{c,90,d} \text{ (panneau gris)} \end{cases} \quad (7.5)$$

Les fibres ne sont pas orientées dans le même sens par rapport à l'effort selon le panneau considéré. Dès lors, la résistance caractéristique diffère :

- pour le panneau bleu : $f_{c,0,d} = 40MPa$ (tableau 7.1 : résistance en compression parallèlement aux fibres).
- pour le panneau gris : $f_{c,90,d} = 3,8MPa$ (tableau 7.1 : résistance en compression en surface, perpendiculairement aux fibres).

L'orientation des fibres du panneau gris étant dix fois défavorable que celle du panneau bleu, il faut utiliser $f_{c,90,d} = 3,8MPa$ et donc la force pouvant être reprise vaut : $N_{max} = 6,27kN$. Chaque assemblage peut donc reprendre un chargement latéral de 639 kg.

7.2.3 Calcul de résistance d'une encoche à un couple pur

L'assemblage à mi-bois doit également être capable de reprendre un couple d'effort. L'objectif de cette section est de déterminer le couple maximal pouvant être repris par une encoche (figure 7.5).

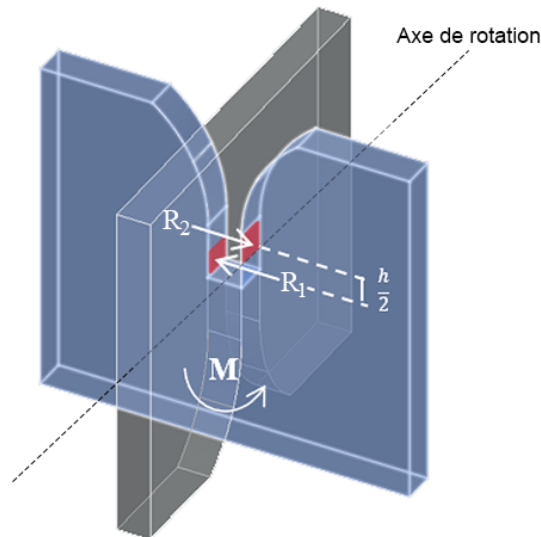


FIGURE 7.5 – Représentation des forces

Certaines sollicitations peuvent induire une rotation d'un panneau, par rapport à l'autre, au niveau des encoches. Le moment crée ainsi un couple (R_1, R_2) qui s'applique sur les deux tranches de l'assemblage au niveau des surfaces rouges de la figure 7.5.

L'équilibre des efforts horizontaux permet de déterminer a à partir de $R_1 = R_2$.

$$\left. \begin{array}{l} R_1 = f_c a t \\ R_2 = f_c (h_v - a) t \end{array} \right\} h_v - a = a \rightarrow a = \frac{h_v}{2} \quad (7.6)$$

L'équilibre des moments par rapport au fond de l'encoche est donné par :

$$M + \frac{h_v}{4} R_1 - \frac{3h_v}{4} R_2 = 0 \quad (7.7)$$

Le moment maximal supporté par l'encoche est donc :

$$M = \frac{h_v^2}{4} f_c t \quad (7.8)$$

où h_v est la hauteur de la partie verticale de l'encoche, t l'épaisseur du panneau et f_c la résistance caractéristique en compression du bois.

A nouveau, deux résistances caractéristiques peuvent être considérées selon que l'on regarde la force qui s'applique sur le panneau gris ou sur le panneau bleu :

- pour le panneau bleu : $f_{c,0,d} = 40\text{MPa}$ (tableau 7.1 : résistance en compression parallèlement aux fibres).
- pour le panneau gris : $f_{c,90,d} = 3,8\text{MPa}$ (tableau 7.1 : résistance en compression en surface, perpendiculairement aux fibres).

En prenant une encoche de $h_v = 0,2\text{m}$ dans un panneau d'une épaisseur de $t = 0,033\text{m}$, le couple maximal pouvant être repris vaut $M = 1,2\text{kN/m}$ en considérant, à nouveau, la résistance caractéristique la plus critique.

7.3 Résistance des colonnes porteuses aux sollicitations latérales

En dehors des charges verticales qui s'appliquent sur les colonnes porteuses, il faut aussi considérer les charges latérales provoquées par les forces horizontales s'exerçant sur la grille. Ces sollicitations peuvent être décomposées selon deux directions (A et B, respectivement en vert et en rouge sur la figure 7.6). Ces deux cas sont analysés dans les deux sous-sections suivantes.

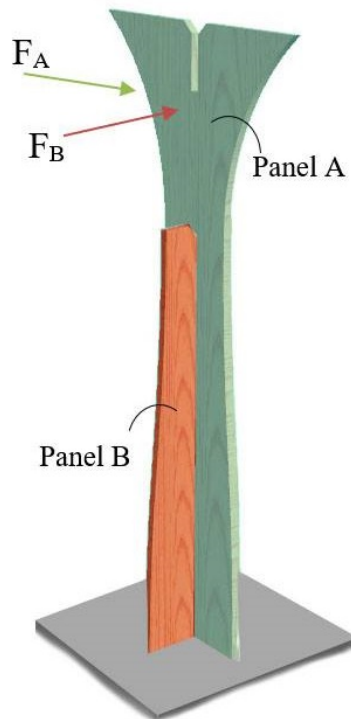


FIGURE 7.6 – Représentation des forces

7.3.1 Sollicitations selon la direction A

Lorsqu'une force F_A s'exerce sur la colonne, le panneau A est sollicité en flexion tandis que les efforts repris par le panneau B sont négligés³. Pour le cas étudié, chaque panneau est considéré comme étant ancré dans le sol au moyen de quatre équerres métalliques boulonnées deux à deux à travers le panneau. Ainsi, l'effort de flexion est équilibré par deux réactions d'appuis capables de reprendre un couple (figure 7.7). Dans cette direction, le panneau A peut, dès lors, être envisagé comme étant encastré au niveau du sol.

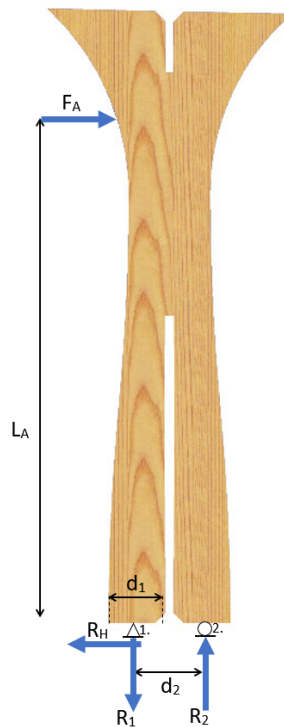


FIGURE 7.7 – Représentation des forces

Pour le panneau A, la somme des forces verticales et horizontales⁴ donne les égalités suivantes :

$$\Sigma F_{\text{verticales}} = 0 \rightarrow R_1 = R_2 \quad (7.9)$$

$$\Sigma F_{\text{Horizontales}} = 0 \rightarrow F_A = R_H \quad (7.10)$$

Le moment par rapport au point 1 est donné par :

$$F_A L_A = R_2 d \quad (7.11)$$

Où R_2 , la réaction d'appui au point 2, est limitée par la résistance en compression du bois.

3. Dans cette direction, les fixations du panneau B auront un comportement similaire à celui d'une rotule étant donné la faible épaisseur du panneau

4. Il est ici considéré que toute la force horizontale R_H est reprise par un seul des deux appuis (cas le plus sécuritaire). En réalité, les deux appuis sont capables de reprendre l'effort horizontal.

La résistance à la compression au pied du panneau peut être calculée avec la formule :

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq f_{c,0,d} \quad (7.12)$$

où $N = R_2$ et $A = d_1 t$

En isolant R_2 :

$$R_2 \leq f_{c,0,d} d_1 t \quad (7.13)$$

Par conséquent :

$$F_A = \frac{t d_1 d_2 f_{c,0,d}}{L_A} \quad (7.14)$$

Dans ce cas, en prenant les dimensions $L_A = 3,5m$, $d_1 = 0,3m$ et $d_2 = 0,3$, un panneau d'épaisseur $t = 0,033m$ avec $f_{c,0,d} = 40MPa$ (tableau 7.1 : résistance en compression parallèlement aux fibres).

La force maximale que peut reprendre le panneau A est : $F_A = 33,9kN$

7.3.2 Sollicitations selon la direction B

Lorsqu'une force est appliquée perpendiculairement au panneau A, la rotation du panneau supérieur provoque une contrainte de compression au niveau de l'encoche sur le panneau inférieur. La situation est représentée sur la figure 7.8.

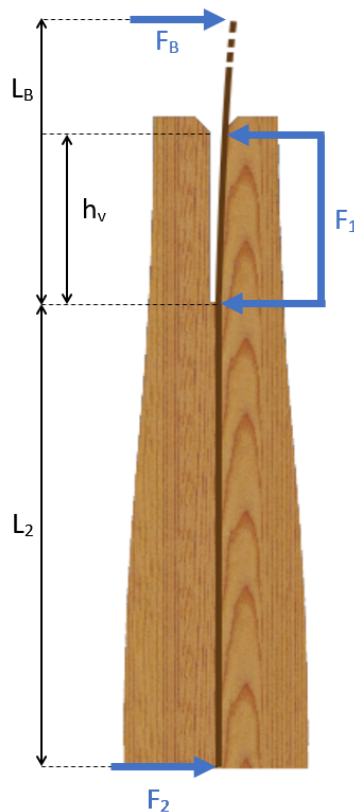


FIGURE 7.8 – Représentation des forces

La somme des forces horizontales est donnée par l'égalité suivante :

$$F_B + F_2 = F_1 \quad (7.15)$$

La somme des moments par rapport au bas de l'encoche vaut :

$$F_B L_B = F_1 \frac{h_v}{2} + F_2 L_2 \quad (7.16)$$

En considérant que F_1 est la force maximale pouvant être exercée en fonction de la résistance en compression du panneau A :

$$F_1 = f_{c,90,d} h_v t \quad (7.17)$$

En substituant F_1 dans l'équation 7.16 et en isolant F_2 , l'égalité suivante peut être obtenue :

$$F_2 = \frac{F_B L_B - f_{c,90,d} \frac{h_v^2 t}{2}}{L_2} \quad (7.18)$$

En remplaçant F_2 dans l'équation 7.15, la force maximale F_B pouvant être appliquée sur le panneau est déterminée par :

$$F_B = f_{c,90,d} h_v t \left(\frac{1 + \frac{h_v}{2L_2}}{1 + \frac{L_B}{L_2}} \right) \quad (7.19)$$

Il reste à vérifier la résistance en flexion du panneau. En effet, la force F_1 induit un moment de flexion capable de rompre le panneau au niveau de l'encoche (voir figure 7.9).

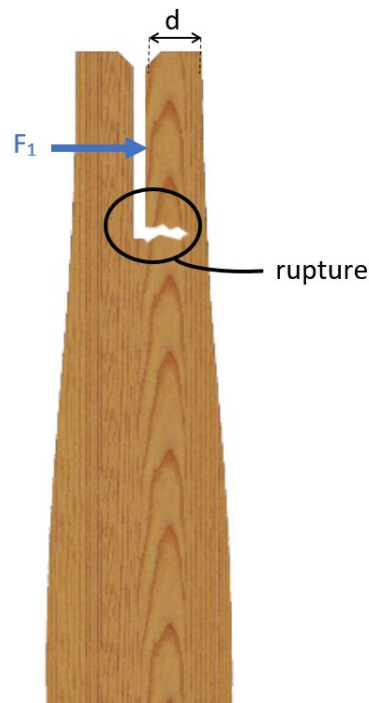


FIGURE 7.9 – Rupture au niveau de l'encoche

Le critère de flexion est donné par l'équation :

$$\frac{6F_1 \frac{h_v}{2}}{td^2} \leq f_{md} = 48MPa \quad (7.20)$$

En fonction de la géométrie de la colonne, la force maximale sera donnée soit par le critère de compression (équation 7.19) soit par le critère de flexion (équation 7.20).

Dans le cas de la structure étudiée, les dimensions types d'une colonne sont :

- $h_v = 1,2m$ pour la hauteur de l'encoche dans le panneau B
- $t = 0,033m$ pour l'épaisseur des panneaux
- $d = 0,2m$ pour la demi-largeur du panneau B
- $f_{c,90,d} = 3,8MPa$ pour la résistance en compression en surface d'un panneau (tableau 7.1)

Il est possible de déterminer si le critère de flexion est dépassé en remplaçant ces valeurs dans l'équation suivante :

$$\frac{6f_{c,90,d} \frac{h_v^2 t}{2}}{td^2} = 410MPa \quad (7.21)$$

Ce qui est beaucoup plus grand que 48MPa. Pour une colonne type de la structure, c'est donc le critère de flexion qui dimensionnera la force maximale F_B . Pour la déterminer, il faut d'abord calculer la force maximale F_1 que le panneau peut supporter :

$$F_{1,max} \leq f_{m,d} \frac{td^2}{3h_v} = 17,6kN \quad (7.22)$$

En résolvant le système à deux équations suivant - avec l'équation de la somme des forces horizontales (équation 7.15) et celle du moment par rapport au bas de l'encoche (équation 7.16) - il est possible de déterminer la force maximale F_B applicable :

$$\left. \begin{array}{l} F_B + F_A = 17,6 \\ F_B L_B = 17,6 \frac{h_v}{2} + F_2 L_2 \end{array} \right\} F_B = 17,6 \left(\frac{\frac{h_v}{2} + L_2}{L_B + L_2} \right) \quad (7.23)$$

En considérant $L_2 = L_B = 1,75m$, la force maximale applicable sur le panneau A est $F_B = 11,8kN$.

7.4 Dimensionnement de la grille

Le code informatique développé sur Grasshopper permet de dessiner une infinité de structures architecturales⁵. Outre la résistance des colonnes et des assemblages, il faut pouvoir confirmer que les dimensions des panneaux, fixées à l'aide des paramètres du code, permettent d'assurer la stabilité de la structure. Ainsi, il faut vérifier si la section des panneaux est suffisante pour transmettre les charges appliquées en fonction des portées à franchir.

Chaque panneau doit être capable de supporter, non seulement son poids propre, mais aussi, le poids des panneaux emboîtés au-dessus de lui. Il faut donc prendre en compte la position de chaque élément dans la séquence de montage.

5. Voir chapitre 5.3.

Trois descentes de charges sont présentées ici :

Cas de charge 1

La première descente de charges est effectuée sur la grille soumise uniquement à son poids propre.

Considérant que la masse volumique du LVL est proche de $\rho = 600\text{kg/m}^3$ et que les panneaux ont comme dimensions : $h = 0,5\text{m}$ et $t = 0,033\text{m}$, la masse linéique m du panneau vaut :

$$m = \rho ht = 9,9\text{kg/m} \quad (7.24)$$

La charge linéique liée au poids propre des panneaux a donc été arrondie à $0,1\text{kN/m}$.

Cas de charge 2

Les deux cas suivants considèrent l'ajout de charges additionnelles, en plus du poids propre des panneaux. La charge est supposée répartie uniformément sur une couverture attachée à la structure. Pour la seconde descente de charges, les hypothèses suivantes ont été prises :

- Une charge de vent de $0,8\text{kN/m}^2$ et une charge de neige de $0,5\text{kN/m}^2$, dirigées vers le bas, sont appliquées à la structure soit une charge totale additionnelle de $1,3\text{ kN/m}^2$.
- Ces deux charges étant reprises par l'ensemble de la grille, la répartition des charges surfaciques peut être schématisée comme sur la figure 7.10 où l'aire de chaque carré jaune vaut la moitié de l'aire d'un carré de la grille.
- Afin de simplifier le raisonnement, il a été décidé d'approximer la charge additionnelle par une charge linéique de $0,65\text{kN/m}$ pouvant être additionnée facilement à la charge linéique du poids propre.
- Étant donné un entraxe de 1m , en additionnant le poids propre et les charges additionnelles, la charge linéique totale vaut $0,75\text{kN/m}$.
- Pour le cas n°2, il est considéré que ces charges ne s'appliquent pas sur les panneaux en porte-à-faux (figure 7.11).

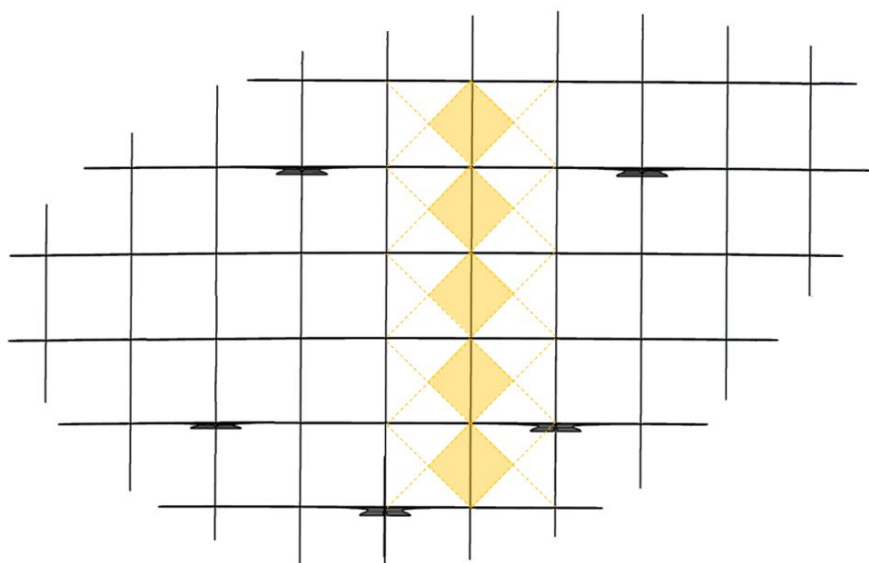


FIGURE 7.10 – Répartition des charges surfaciques sur une poutre lors du cas de charge n°2

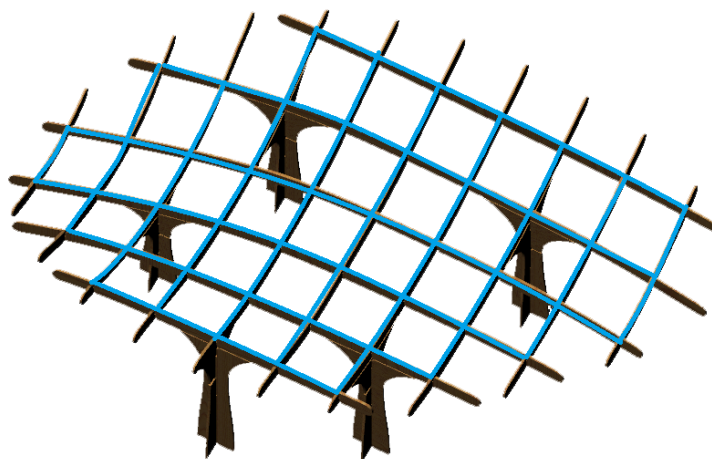


FIGURE 7.11 – Représentation de la zone d'application des charge dans le du cas n°2

Cas de charge 3

Pour la troisième descente de charges, les hypothèses précédentes sont conservées dans la mesure où il est également considéré qu'une charge linéique totale de 0.65kN/m est ajoutée au poids propre des panneaux.

Par contre, il est supposé que ces charges s'appliquent, cette fois-ci, sur les panneaux en porte-à-faux et qu'afin d'uniformiser les calculs, ceux-ci dépassent tous d'1m au bord de la grille (figure 7.12 et 7.13).

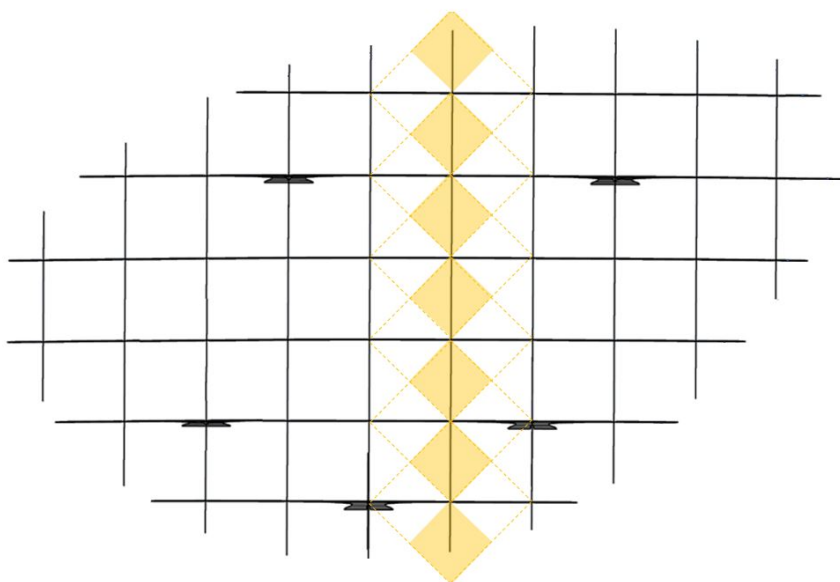


FIGURE 7.12 – Répartition des charges surfaciques sur une poutre lors du cas de charge n°3

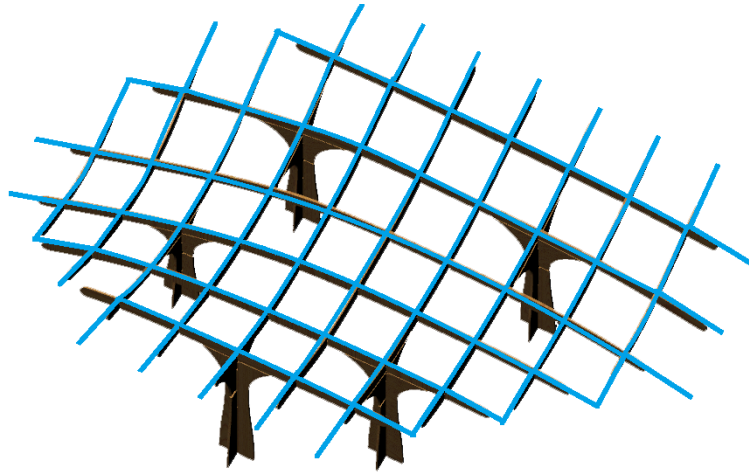


FIGURE 7.13 – Représentation de la zone d’application des charge dans le du cas n°3

7.4.1 Descente de charges

La démarche adoptée pour calculer la descente de charges consiste à considérer successivement chacun des panneaux, en suivant l’ordre inverse de la séquence de montage choisie ⁶. Pour plus de clarté, les panneaux ont été numérotés (figure 7.14). Les 16 panneaux de la grille ont été étudiés. Les résultats du premier, du douzième et du dernier panneau sont présentés dans cette section (les autres sont disponibles en annexe). Ainsi, suivant l’ordre de montage défini :

- le premier ⁷ panneau à étudier porte le n° 16,
- le douzième panneau à étudier porte le n° 9,
- le dernier panneau à étudier porte le n° 5.

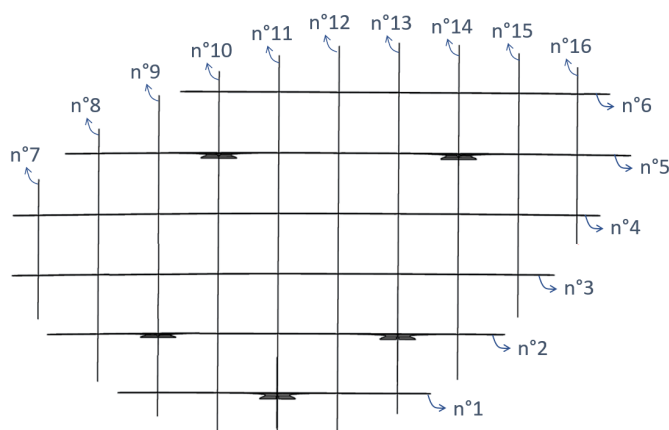


FIGURE 7.14 – Numérotation des panneaux de la grille

Pour chaque panneau, il est nécessaire de calculer les réactions aux appuis. Chaque encoche sur laquelle repose le panneau constitue un appui. Ainsi, la plupart des poutres sont hyperstatiques. Toutes les réactions d’appuis ont été calculées grâce au logiciel de calcul ISSD. ⁸.

6. L’ordre complet est détaillé en annexe.

7. Le premier panneau à étudier est donc le dernier à être posé sur la structure puisqu’il s’agit de l’ordre inverse de la séquence de montage.

8. ©Pierre Latteur/Struct&Soft

Panneau n° 16

Dans la figure 7.15, ci-dessous, les flèches bleues représentent les charges (poids propre) qui s'appliquent sur le panneau n° 16 tandis que les trois flèches grises représentent les réactions d'appui (R_{v1} , R_{v2} , R_{v3}).

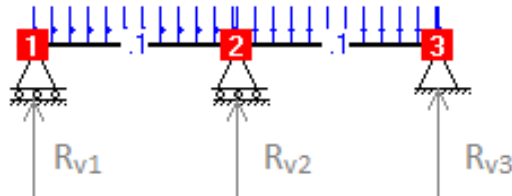


FIGURE 7.15 – Représentation des charges dans ISSD - panneau 16

Pour le panneau n° 16, les réactions d'appui valent :

$$\begin{cases} R_{v1} = 0,038kN \\ R_{v2} = 0,125kN \\ R_{v3} = 0,038kN \end{cases}$$

Ces réactions d'appui (R_{v1} , R_{v2} , R_{v3}), symbolisées par un point rouge dans la figure 7.16 ci-dessous, constituent les forces qui s'appliquent sur les autres panneaux (n°4, n° 5 et n° 6).

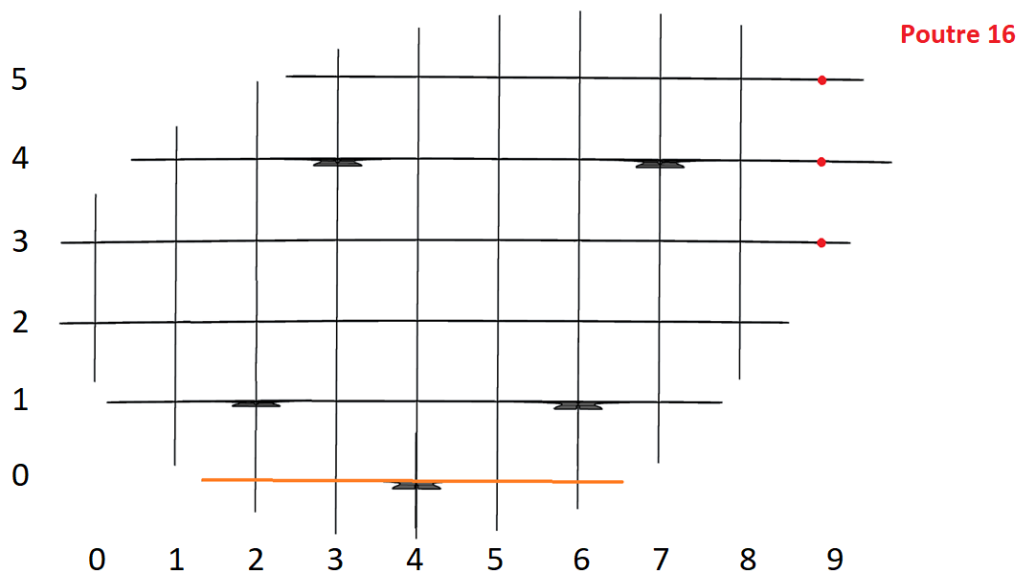


FIGURE 7.16 – Repport des forces - panneau 16

Panneau n° 9

Dans la figure 7.17 présentée ci-dessous, le panneau n°9 est représenté par le trait vertical jaune. Les forces qui s’appliquent sur lui proviennent des autres panneaux appuyés sur lui et sont représentées par des points de couleur (point vert pour le panneau n°4, point beige pour le panneau n° 3, point bleu/gris pour le panneau n° 2 et point orange pour le panneau n° 1).

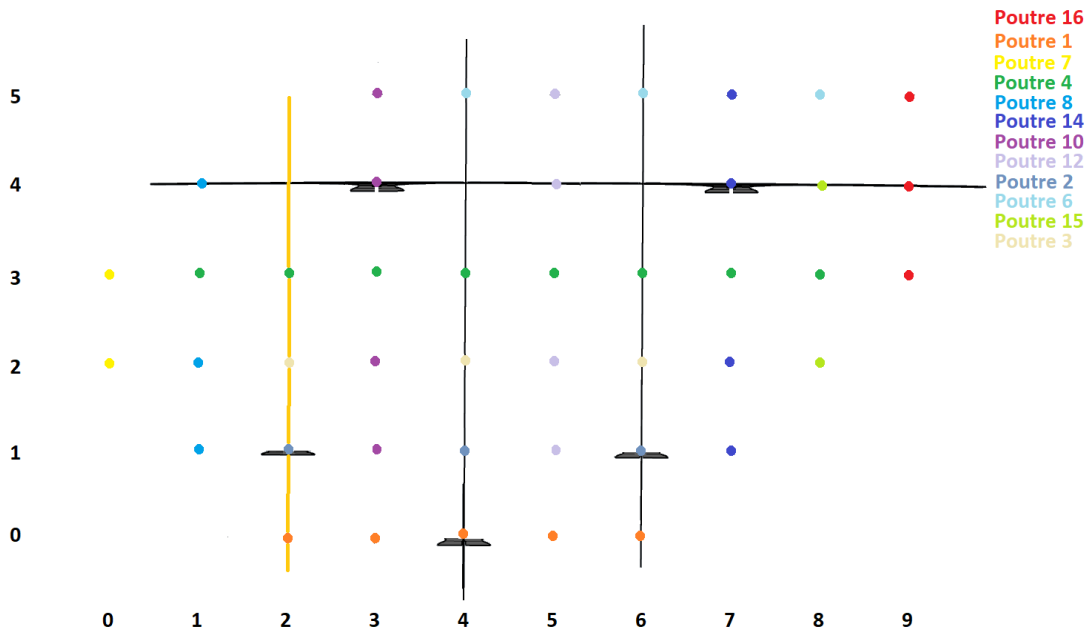


FIGURE 7.17 – Report des forces - panneau 9

Dans la figure 7.18 ci-dessous, les flèches bleues représentent les charges (poids propre) qui s’appliquent sur le panneau n° 9. Les flèches vertes symbolisent les charges issues des panneaux qui s’appuient sur lui (pour rappel, les panneaux n° 4, n° 3, n°2 et n° 1). Les deux flèches grises schématisent les réactions d’appui (Rv1, Rv2).

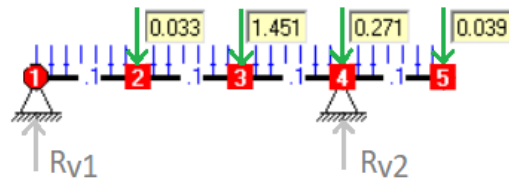


FIGURE 7.18 – Représentation des charges dans ISSD - Panneau 9

Pour le panneau n° 9, les réactions d’appui valent :

$$\begin{cases} R_{v1} = 0,626kN \\ R_{v2} = 1,568kN \end{cases}$$

Panneau n° 5

Dans la figure 7.19 ci-dessous, le panneau n°5 est représenté par le trait horizontal noir. Les forces qui s'appliquent sur lui sont à nouveau symbolisées par des points de couleurs (soit 9 points de couleurs correspondant aux panneaux allant du n° 8 au n° 16).

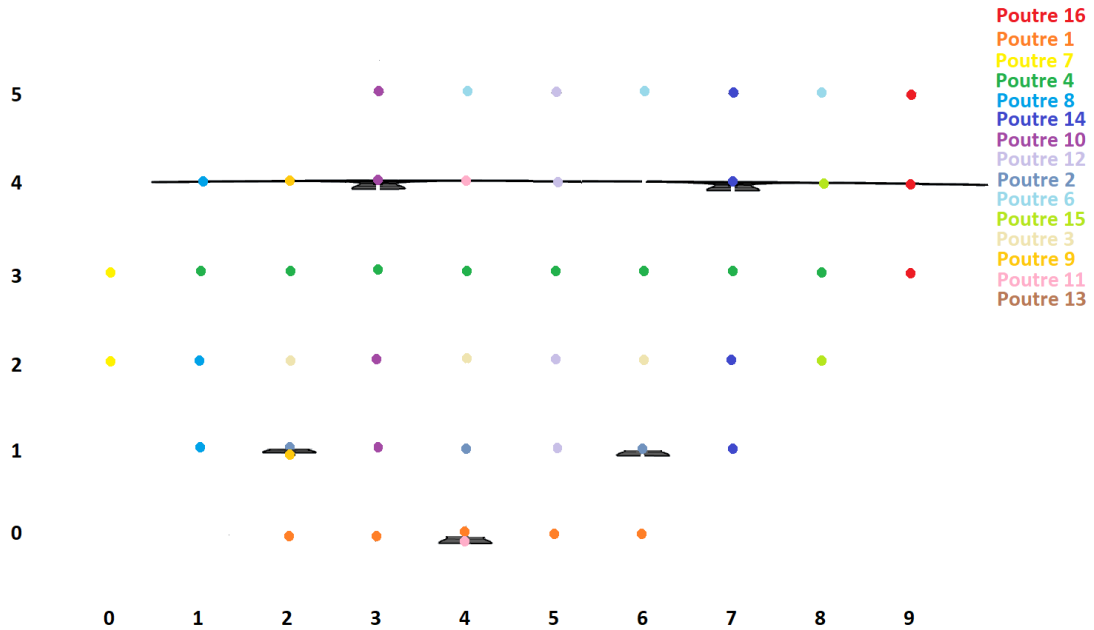


FIGURE 7.19 – Report des forces- panneau 5

Dans la figure 7.20 ci-dessous, les flèches bleues représentent les charges (poids propre) qui s'appliquent sur le panneau n° 5. Les flèches vertes symbolisent les charges issues des panneaux qui s'appuient sur lui. Les deux flèches grises schématisent les réactions d'appui (R_{v1} , R_{v2}).

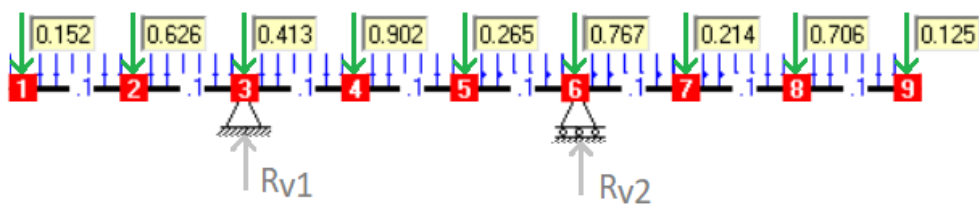


FIGURE 7.20 – Représentation des charges dans ISSD - panneau 5

Pour le panneau n° 5, les réactions d'appui valent :

$$\begin{cases} R_{v1} = 2,58kN \\ R_{v2} = 2,41kN \end{cases}$$

7.4.2 Résistance des sections

Les descentes de charges effectuées dans la partie précédente permettent de vérifier que la section des panneaux résiste au poids propre de la grille ainsi qu'à l'application d'une charge additionnelle. Trois critères ont été contrôlés : le critère de flexion, l'effort tranchant et la flèche admissible.

Critère de flexion

Le déversement peut être négligé en raison de la géométrie de la structure⁹. Dès lors, l'équation qui régit le critère de flexion est la suivante :

$$\sigma_{m,Ed} = \frac{6M_{Ed}}{bh_u^2} \leq f_{m,0,d} \quad (7.25)$$

- $f_{m,0,d} = 48\text{MPa}$ (tableau 7.1 : résistance en flexion)
- $b = 0,033\text{m}$ est la largeur du panneau
- $h_u = 0,25\text{m}$ est la hauteur utile pouvant reprendre la flexion dans le panneau

Avec ces paramètres, le moment de flexion maximal pouvant être repris par chaque panneau est de 16,5kNm.

Le tableau 7.2 reprend pour chaque cas de charge, les moments maximaux des quatre panneaux les plus chargés, déterminés via ISSD.

Moment maximal [kNm]			
Cas de charge	Cas de charge 1	Cas de charge 2	Cas de charge 3
Panneau n° 5	1,18	7,49	14,68
Panneau n° 13	0,51	2,97	2,62
Panneau n° 11	0,66	3,18	6,07
Panneau n° 9	1,02	4,27	4,92

TABLE 7.2 – Moment maximal dans les 4 panneaux les plus chargés

Ces résultats montrent que le critère de flexion n'est pas dépassé. En effet, les valeurs ne dépassent pas 16,5kNm.

Il est intéressant de noter l'incidence de la prise en compte des porte-à-faux sur les panneaux n° 5 et n° 11. En effet, cela modifie la descente des charges et impacte la répartition des forces, et en conséquence des moments, dans la structure. Les valeurs doublent presque du cas de charge n°2 au n°3.

Critère d'effort tranchant

L'équation qui régit le critère d'effort tranchant est la suivante :

$$\tau_{Ed} = \frac{3V_{Ed}}{2k_{cr}bh_u} \leq f_{v,d} \quad (7.26)$$

- $f_{v,d} = 4,6\text{MPa}$ (tableau 7.1 : résistance à un effort tranchant)
- $b = 0,033\text{m}$ est la largeur du panneau

9. L'entraxe entre deux poutres de la grille étant fixé à 1m, le déversement d'un élément est empêché par les nombreuses connexions avec les panneaux perpendiculaires.

- $h_u = 0,25m$ est la hauteur utile pouvant reprendre la flexion dans le panneau
- $k_{cr} = 0,67$ est un coefficient tenant compte de l'existence éventuelle de fissures dans le bois [18]

L'effort tranchant maximal pouvant être repris par les panneaux est de 16,95kN.

Pour chaque cas de charge, les efforts tranchants maximaux des quatre panneaux les plus chargés sont repris dans le tableau 7.3 ci-dessous.

Effort tranchant maximal [kN]			
Cas de charge	Cas de charge 1	Cas de charge 2	Cas de charge 3
Panneau n° 5	1,19	7,50	14,68
Panneau n° 13	0,55	3,22	3,32
Panneau n° 11	0,66	3,18	6,06
Panneau n° 9	1,06	4,53	7,22

TABLE 7.3 – Effort tranchant maximal dans les 4 panneaux les plus chargés

Ces résultats montrent que le critère d'effort tranchant n'est pas dépassé puisque les efforts tranchants ne dépassent pas 16,95kN.

A nouveau, il est intéressant de noter que, en considérant que les porte-faux sont chargés, les efforts tranchants maximaux doublent presque pour le panneau n° 5 et le n° 11 par rapport au cas de charge n°2. Ce phénomène est dû aux changements de répartition des efforts à travers la descente de charges.

Critère de flèche

Le critère de flèche a également été analysé avec le logiciel ISSD.

Pour le panneau le plus chargé (le panneau n° 5), lorsque la structure est uniquement soumise à son poids propre (cas de charge 1), la déformée est représentée sur la figure 7.21. Les valeurs des déplacements des noeuds sont reprises dans le tableau 7.4

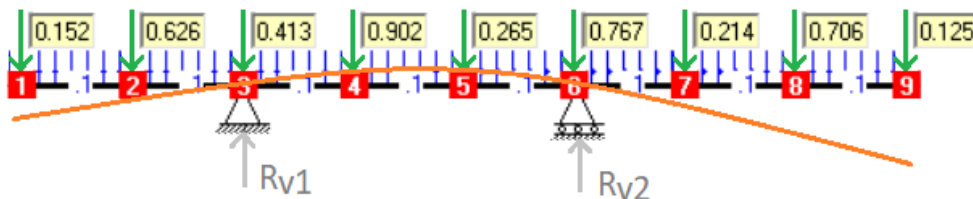


FIGURE 7.21 – Représentation de la déformée du panneau n° 5 dans ISSD

Déplacements des noeuds			
	X [mm]	Y[mm]	Ang.[rad]
Noeud 1	0,000	5,991	-0,005
Noeud 2	0,000	2,788	-0,005
Noeud 3	0,000	0,000	-0,004
Noeud 4	0,000	-1,54	-0,002
Noeud 5	0,000	-1,79	0,001
Noeud 6	0,000	0,000	0,005
Noeud 7	0,000	4,614	0,010
Noeud 8	0,000	10,877	0,011
Noeud 9	0,000	17,53	0,011

TABLE 7.4 – Déplacements des noeuds du panneau 5 - tableau donné par ISSD

Le déplacement le plus grand est celui du noeud 9 (1,8 cm). La présence d'une telle flèche, alors que la structure est uniquement soumise à son poids propre, met en évidence l'importance, lors du montage, de placer les panneaux internes en premier lieu afin d'éviter de charger les panneaux externes.

Le critère de flèche est un dimensionnement à l'état limite de service (ELS) qui impose de vérifier que les déformations de la structure ne dépassent pas une certaine limite. Celle-ci dépend de la fonction pour laquelle la structure a été construite. Par exemple, le critère de flèche est beaucoup plus strict lorsqu'on construit un pont ferroviaire que lorsqu'on construit une passerelle piétonne étant donné que les voies ferrées ont besoin d'avoir une assise rigide et stable.

Dans le cadre de ce mémoire, il semble néanmoins important de souligner que les flèches ne doivent pas être trop importantes durant la phase de montage. En effet, pour que la structure reste "drone compatible", les déformations ne doivent pas empêcher l'emboîtement des autres panneaux de la grille.

Toutefois, les déplacements verticaux sont nettement moins critiques que les déplacements horizontaux qui créeraient un décalage de toutes les positions des assemblages par rapport aux points virtuels établis dans le code. Un déplacement vertical de 1,8 cm reste acceptable car la pièce de bois sera juste lâchée par le drone un peu plus haut que prévu par rapport à l'encoche.

7.5 Résultats

L'étude du cas particulier de la structure présentée sur la figure 5.13 a permis d'obtenir les résultats suivants :

Caractérisation de l'assemblage à mi-bois

Trois résistances différentes ont été analysées :

- Pour la résistance à un effort de compression dû à une force verticale : chaque encoche peut reprendre une force $N_{max} = 8,15kN$.
- Pour la résistance à un effort de compression dû à une force latérale : chaque encoche peut reprendre une force $N_{max} = 6,27kN$.

-
- Pour la résistance une encoche à un couple pur : chaque encoche peut reprendre un moment $M = 1,2kN/m$

Caractérisation des colonnes

- L'analyse de la résistance au flambement permet de déterminer la force maximale N_{max} applicable sur chaque colonne : $N_{max} = 11,94kN$
- L'analyse de la résistance des colonnes porteuses aux sollicitations latérales permet de déterminer les forces latérales maximales $N_{A,B,max}$ applicables sur chaque colonne : $N_{A,max} = 33,9kN$ et $N_{B,max} = 11,8kN$

Dimensionnement de la grille

Les cas de charge développés dans cette section ont mis en évidence que les dimensions choisies pour les panneaux de la structure étudiée permettaient à la grille de supporter son poids propre ainsi qu'une charge surfacique équivalente à $1,3kN/m^2$.

ENJEUX ÉTHIQUES, SOCIAUX ET HUMANITAIRES

Les défis sociaux, économiques et environnementaux du 21^{ème} siècle sont immenses pour ne pas dire vertigineux. Le développement de solutions innovantes, comme le système en grille présenté dans ce mémoire, vise à encourager une façon de construire plus durable. Dès lors, différentes pistes de réflexion ont été menées sur les utilisations possibles de cette typologie structurale et sur les enjeux éthiques autour de la "robonumérisation" de la construction.

8.1 Éthique de la construction robotique

Les robots remplacent de plus en plus les êtres humains dans l'exécution de tâches quotidiennes. Qu'il s'agisse de conduire¹, d'enseigner², de réaliser une opération chirurgicale³ ou encore de faire la guerre⁴, les machines prennent peu à peu le relais. De nombreux emplois sont ainsi menacés, particulièrement pour les postes occupés par une main d'œuvre peu qualifiée. Pour éviter la suppression massive d'emplois, certains prônent un ralentissement technologique. En 2017, le milliardaire Bill Gates⁵ proposait ainsi d'instaurer une taxe sur les robots pour ralentir le processus d'automatisation et financer des programmes de requalification professionnelle[19].

Un récent rapport du Parlement européen[20] relève néanmoins que "l'automatisation de nombreux emplois a le potentiel de libérer les personnes des tâches manuelles monotones et de leur permettre de s'orienter, à la place, vers des tâches plus créatives et constructives". La position de l'Union européenne est de ne pas "mettre un frein à l'innovation", étant donné les opportunités qu'offre la révolution digitale en matière d'économie, de santé, d'environnement et de développement individuel. Le rapport souligne néanmoins "la nécessité de réfléchir [...] à l'avenir de l'éducation, de l'emploi et des politiques sociales", étant donné les risques engendrés par l'usage de la robotique.

L'utilisation des drones, et plus généralement des robots pour construire, aura un impact certain sur le travail des ouvriers. D'une part, certains métiers seront amenés à disparaître. D'autre part, de nouveaux emplois seront créés. Les avantages du drone en termes de sécurité, de rapidité et

1. Tesla, la firme de l'entrepreneur Elon Musk, prévoit de parvenir à développer un système de conduite totalement autonome d'ici quelques années.

2. En 2016, Ashok Goel, professeur au Georgia Institute of Technology, est parvenu à développer une intelligence artificielle suffisamment avancée pour répondre aux questions des étudiants sur le forum en ligne du cours à un point tel que ceux-ci pensaient avoir affaire à un véritable assistant.

3. Le robot Da Vinci permet, depuis les années 2000, à un chirurgien d'opérer un patient à distance avec une précision accrue.

4. Le développement d'engin militaire autonome, tels que les drones de combat en cours de développement, pose de plus en plus de questions sur la responsabilité morale et les enjeux éthiques autour de la délégation de la prise de décision de vie ou de mort à des robots.

5. Fondateur principal de la Microsoft Corporation.

de rentabilité ont été évoqués dans les chapitres précédents. Les tâches dangereuses et répétitives pourront donc être confiées aux machines tandis que les missions requérant plus de créativité ou plus d'expertise pourront être réservées aux ouvriers.

Ainsi, la construction par drone nécessite la présence de techniciens capables de contrôler et réparer les engins. Ils auraient également la responsabilité d'adapter l'ensemble du système en fonction de la réalité du terrain. Néanmoins, cette requalification du personnel de chantier est conditionnée par la mise en place de formations adéquates pour assurer la transition d'un mode de construction à l'autre.

Par ailleurs, la réappropriation de certains savoir-faire artisanaux qui avaient été abandonnés au profit de la production en série pourrait aussi être l'un des enjeux de cette mutation technologique. En effet, ces techniques traditionnelles, qui étaient devenues peu compétitives à cause de l'industrialisation, sont une grande source d'inspiration pour le développement de solutions adaptables localement grâce à la conception paramétrique.

8.2 Architecture Open Source

Le creusement des inégalités et l'accumulation des richesses entre les mains d'une minorité doivent également être anticipés. En 2016, Stephen Hawking⁶ prédisait que "chacun pourra vivre une voluptueuse existence de loisirs si les richesses produites par les machines sont réparties". Mais il ajoutait : "la majorité des gens vivront dans la misère si les propriétaires de ces machines parviennent à nullifier la redistribution des richesses." Il constate que "jusqu'ici, la tendance semble être la seconde option, et la technologie creuse toujours plus les inégalités".[21]

La robonumérisation permet de diminuer les coûts, le temps et la pénibilité de la construction. Elle peut aussi la rendre plus accessible. En témoigne l'émergence d'un mouvement d'*Architecture Open Source*⁷ s'appuyant sur le partage d'outils interactifs permettant à chacun d'être acteur de la conception de son environnement.

Imprimer sa maison

L'initiative WikiHouse[22], par exemple, est une plate-forme d'échange de typologies modulables se servant de la fabrication numérique pour permettre à n'importe qui de télécharger, d'"imprimer"⁸ puis d'assembler des maisons personnalisées. Le principe constructif est relativement similaire à celui développé dans ce mémoire, car il s'agit également de panneaux de bois découpés par des machines à commandes numériques et pouvant être montés et démontés facilement sans utiliser de connexions métalliques (voir figure 8.1)).

6. (1942-2018) physicien britannique célèbre pour ses recherches sur les trous noirs et la gravité quantique, auteur d'"*Une brève histoire du temps*", un best seller de vulgarisation scientifique qui reprend ses théories sur la naissance de l'univers.

7. Open-Source Architecture abrégé parfois en OSArc.

8. Imprimer au sens large du terme, c'est-à-dire "passer du virtuel au réel". Cela peut être via l'impression 3D mais aussi via le découpage numérique des pièces à assembler.



FIGURE 8.1 – Architecture 00, A-Barn, WikiHouse, Ecosse (2014)

L'intelligence collective permet d'optimiser les techniques de construction. Bien que chaque projet soit unique, certains aspects ont souvent déjà été résolus par d'autres concepteurs, ailleurs dans le monde. En rendant leur travail accessible sous une licence libre, ils laissent l'opportunité à d'autres de réutiliser et d'améliorer leurs idées. Cette collaboration permet de développer des projets de plus en plus durables. C'est en ce sens qu'en 2016, Alejandro Aravena⁹ annonçait la mise en ligne de nombreux plans réalisés par son bureau pour des logements sociaux au Chili dans le but qu'ils puissent être transposés ailleurs dans le monde et modifiés par les communautés en fonction des conditions locales. [23]

Le code Grasshopper, développé dans ce mémoire pour le système de grille de panneaux entrecroisés, s'inscrit dans ce mouvement Open Source. Il s'agit en effet d'un outil interactif permettant à n'importe qui de concevoir une structure complexe à base d'éléments légers pouvant être assemblés rapidement par des drones (ou par des ouvriers¹⁰). Au delà des considérations techniques, il y a donc une dimension sociale participative qui peut être développée à partir de la conception paramétrique.

9. Architecte chilien, lauréat du prix Pritzker 2016 et directeur du bureau Elemental.

10. L'avantage de concevoir des éléments drone-compatibles est qu'ils sont aussi "humain-compatibles"... Le poids des éléments reste la limite principale et les assemblages développés spécifiquement pour les drones permettent aussi de faciliter le montage manuel puisqu'ils ne nécessitent pas d'outils particuliers. Les drones conservent toutefois l'avantage de pouvoir se déplacer facilement en hauteur et offrent donc une alternative plus sécuritaire pour des projets de plus grande envergure.

8.3 Architecture d'urgence

Une grande partie des recherches scientifiques sont financées par des budgets provenant de programmes militaires¹¹. Des travaux sur les drones sont ainsi utilisés pour développer un arsenal aérien autonome dénoncé par beaucoup comme immoral. L'utilisation de drones pour construire plutôt que pour détruire est un des objectifs visés par les recherches menées à la Drone Zone de l'UCLouvain.

Les drones peuvent en effet, et heureusement, servir des applications plus nobles que la guerre. Ainsi, le projet Redline¹² a pour but d'installer des routes aériennes en Afrique afin de livrer du matériel médical et de premiers secours avec des drones. Trois premiers « drone-ports » devraient ainsi voir le jour au Rwanda aux alentours de 2020. Dans ce même esprit de coopération internationale, la capacité des drones à se déplacer dans des territoires peu accessibles, où les infrastructures routières sont parfois très limitées, voire inexistantes, permet d'envisager leur utilisation dans le cadre de projets d'aide humanitaire.



FIGURE 8.2 – Redline droneport concept, Norman Foster Foundation (2015).

En effet, les catastrophes naturelles de ces dernières années ont mis en évidence qu'il était nécessaire de pouvoir reloger rapidement les populations touchées. En 2005, le cyclone Katrina a ainsi détruit plusieurs dizaines de milliers d'habitations aux Etats-Unis, obligeant leurs occupants à trouver refuge dans des abris de fortune ou des campements mis en place par le gouvernement.

La notion même d'habitat d'urgence se trouve au coeur de nombreuses réflexions architecturales. De Jean Prouvé¹³ à Shigeru Ban¹⁴, de nombreuses propositions ont été évoquées pour améliorer ces espaces de *survie* en véritables lieux de *vie*. Les enjeux sont multiples. D'une part, il faut assurer

11. Aux Etats-Unis, la DARPA (Agence de recherche avancées de projets de défense) bénéficie d'un budget de presque 3 milliards par an pour financer différents projets de recherches et est à l'origine de nombreux programmes pouvant servir des applications militaires.

12. Une initiative du laboratoire de recherche Afrotech au sein de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne en partenariat avec le bureau d'architecte Foster + Partners.

13. Dès 1939, l'architecte et designer français, Jean Prouvé, proposait des habitations préfabriquées, légères et démontables à destination des sinistrés et des sans-abris.

14. Lauréat du prix Pritzker 2014 et conseiller pour le Haut Commissariat des Nations unies pour les réfugiés, L'architecte japonais Shigeru Ban est réputé pour son travail sur les habitations temporaires à base de tubes en carton.

la rapidité de l'exécution tout en assumant un faible coût de construction. D'autre part, il convient de pouvoir garantir un minimum de dignité aux habitants pendant une période d'occupation qui peut durer plusieurs mois, voire plusieurs années.



FIGURE 8.3 – Paper Log House, Shigeru Ban, Kobe (1995).

L'intérêt des structures en grille développées dans le cadre de ce mémoire est qu'elles pourront être rapidement assemblées par des drones, ou des hommes. De plus, le bois est un matériau léger et disponible dans la plupart des régions du monde, ce qui en fait un bon candidat pour la réalisation d'habitations d'urgence. En ayant recours à la conception paramétrique, chaque pavillon pourra en outre être adapté en fonction des besoins des futurs occupants, sans augmenter le coup de fabrication.

Bien que de nombreux défis doivent encore être relevés¹⁵ pour exploiter le plein potentiel de cette typologie structurale, ce système offre l'opportunité de repenser l'habitat d'urgence non plus à travers la production en série, mais à travers la personnalisation du logement. Et cela pour permettre aux sinistrés de s'approprier un espace unique et adapté à leurs besoins.

15. Isolation thermique et acoustique, étanchéité, accessibilité des usagers au processus de conception...

CONCLUSION

La construction en bois drone-compatible est un nouveau domaine de recherche. Ses futures applications promettent de révolutionner le processus de construction. Les recherches précédentes avaient confirmé la faisabilité de réaliser des assemblages drone-compatibles en bois en suivant une logique similaire à celle employée pour adapter les systèmes de maçonnerie. L'objectif de ce travail est de montrer l'intérêt d'associer la conception paramétrique à la construction par drone en développant des structures architecturales complexes en bois.

En effet, l'un des avantages de l'utilisation des drones est qu'ils permettent d'automatiser le processus de construction de formes complexes. Grâce aux outils paramétriques, il est possible de développer un code capable de générer à la fois la géométrie de la structure et les instructions de vol pour les drones. Ce processus permet également de passer outre la nécessité de dessiner chaque connexion et il autorise l'emploi d'une multitude d'assemblages uniques. La conception est ainsi directement liée à la réalisation, ce qui diminue les incertitudes et le risque d'erreur au moment de l'exécution.

Une multitude de possibilités

L'utilisation d'une grille de panneaux de bois imbriqués permet ainsi le développement d'une grande variété de formes pouvant convenir à différents projets. L'intégration des contraintes géométriques liées aux assemblages à mi-bois dans l'algorithme permet également d'adapter la typologie structurale à tout chantier de construction et démontre le potentiel qu'il y a à construire avec beaucoup de petits éléments assemblés par des drones.

Bien que l'outil paramétrique se révèle extrêmement puissant lorsqu'il s'agit de tester plusieurs configurations, la mise en place d'un code opérationnel sur Grasshopper peut néanmoins prendre un temps considérable. Il était donc important d'identifier, au préalable, le but à atteindre dans le cadre de cette recherche. Ici l'enjeu était d'une part, de pouvoir créer des structures organiques très diversifiées¹⁶ et d'autre part, de pouvoir contrôler la géométrie des assemblages à mi-bois¹⁷.

Et demain ?

Ce code pourrait, par la suite, être optimisé pour déterminer la séquence de montage assurant la plus grande stabilité. D'autres recherches devraient également être menées pour mieux caractériser le comportement structural d'un tel système. En regroupant un maximum de connaissances au sein d'un seul algorithme interactif, le concepteur serait libre d'optimiser la géométrie de la structure ou au contraire, de créer des formes particulièrement complexes tout en étant assuré qu'elles résistent à un chargement donné. Plus ces processus sont automatisés, plus il est possible de tester des possibilités différentes et de choisir la plus appropriée en connaissance de cause.

16. A ce sujet, l'utilisation d'une surface NURBS déformable grâce à ses points de contrôle s'est révélée particulièrement efficace pour pouvoir interagir directement avec la géométrie de la structure.

17. En employant un seul type d'assemblage pour l'ensemble de la structure, le nombre de paramètres nécessaires a pu être minimisé et le système constructif tout comme le code Grasshopper ont pu être rationalisés.

L'intérêt principal de la typologie structurale présentée dans ce mémoire est de repousser les limites du processus d'empilement inhérent à la construction par drone. Jusqu'alors, les possibilités architecturales des structures testées dans le cadre des recherches précédentes étaient relativement restreintes en terme de spatialité. L'algorithme, développé ici, permet d'imaginer la réalisation de géométries complexes et originales, avec des portées beaucoup plus conséquentes.

BIBLIOGRAPHIE

Introduction

- [1] P. LATTEUR et al., « “Vers une robonumérisation de la construction” 34èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil de l’AUGC », in : (25-29 septembre 2017).

Chapitre 1 - Le numérique, un enjeu majeur pour la construction

- [2] P. MICKLE, *1961 : A peep into the automated future*, 1999, URL : <http://www.capitalcentury.com/1961.html> (visité le 07/05/2018).
- [3] SPF ECONOMIE, *Agenda numérique pour l’Europe*, 2018, URL : <https://economie.fgov.be/fr/themes/line/agenda-numerique-pour-leurope> (visité le 07/05/2018).
- [4] Commission EUROPÉENNE, *The Digital Economy and Society Index (DESI)*, 2017, URL : <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/desi> (visité le 07/05/2018).
- [5] Confédération CONSTRUCTION, *La construction numérique, Balises pour une transition réussie*, 2017, URL : https://www.confederationconstruction.be/Portals/0/documenten/documenten%20-%20enkel%20leden/jaarverslag/Rapport%20Annuel_Confederation%20Construction_2016_2017_FR_WEB-190617.pdf (visité le 07/05/2018).
- [6] Fédération de l’Industrie EUROPÉENNE DE LA CONSTRUCTION, *What else is Construction 4.0?*, 2017, URL : <http://www.fiec.eu/en/themes-72/construction-40/what-else-is-construction-40.aspx> (visité le 07/05/2018).
- [7] MX3D, *MX3D Bridge*, 2018, URL : <http://mx3d.com/projects/bridge/> (visité le 07/05/2018).

Chapitre 2 - Conception paramétrique

- [8] R. MAKERT et G. ALVES, « “Between Designer and Design : Parametric Design and Prototyping Considerations on Gaudí’s Sagrada Familia” *Periodica Polytechnica Architecture* », in : (2016), pages 89-93.
- [9] C. ROUCAIROL et A. DAVID, « Un algorithme d’aide à la conception en architecture », in : *Revue française d’automatique, informatique, recherche opérationnelle* (septembre 1973).

Chapitre 3 - Construire avec les drones

- [10] P. LATTEUR et al., « “Masonry Construction with drones” *International Association for Shell and Spatial Structures - Tokyo* », in : (26-30 September 2016).

- [11] P. LATTEUR et al., « "A Few Aspects of Timber UAV-based Construction" International Association for Shell and Spatial Structures - Hambourg », in : (25-29 septembre 2017).
- [12] C. MANDERLIER et T. de FURSTENBERG, « Etude de faisabilité de structures en bois drone-compatible », UCL, 2017.

Chapitre 6 - Montage de la structure

- [13] V. PARIZEL et J.-F. LEBOUTTE, « Mémoire sous la supervision de P. Latteur et S. Goessens, Développement d'un système constructif "drone-compatible" pour la construction de maisons unifamiliales en maçonnerie et en béton », UCL, 2017.
- [14] A. MONCOURRIER et A. NAVEAU, « Master thesis under the supervision of P. Latteur "Development of a Drone-Compatible Masonry Construction System" », Université catholique de Louvain, 2016.
- [15] E. HECHT, *Physique*, de boeck, 1999.

Chapitre 7 - Caractérisation mécanique

- [16] METSÄWOOD, *Kerto LVL Q-Pannel*, 2016, URL : <https://www.metsawood.com/global/Tools/MaterialArchive/MaterialArchive/MW-KertoLVL-Qpanel-datasheet-FR.pdf> (visité le 25/05/2018).
- [17] J. L. TRINH, « Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois », in : *Techniques de l'ingénieur Construction bois base documentaire : TIB824.ref. article : c2442* (2015).
- [18] Pierre LATTEUR, *Structure en bois*, LGCIV2043.

Chapitre 8 - Enjeux éthiques, sociaux et humanitaires

- [19] K.-J. DELANEY, *The robot that takes your job should pay taxes, says Bill Gates*, 2017, URL : <https://qz.com/911968/bill-gates-the-robot-that-takes-your-job-should-pay-taxes/> (visité le 24/05/2018).
- [20] M. DELVAUX, *Rapport du Parlement européen contenant des recommandations à la Commission concernant des règles de droit civil sur la robotique*, 2017, URL : <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+REPORT+A8-2017-0005+0+DOC+XML+V0//FR> (visité le 17/05/2018).
- [21] *Science AMA Series : Stephen Hawking*, 2016, URL : https://www.reddit.com/r/science/comments/3nyn5i/science_ama_series_stephen_hawking_ama_answers/ (visité le 24/05/2018).
- [22] *WikiHouse*, 2018, URL : <https://wikihouse.cc/about> (visité le 13/05/2018).
- [23] J. McKNIGHT, *Alejandro Aravena makes housing designs available to the public for free*, 2016, URL : <https://www.dezeen.com/2016/04/06/alejandro-aravena-elemental-social-housing-designs-architecture-open-source-pritzker/> (visité le 13/05/2018).

Accès au code paramétrique

Les fichiers Rhino (.rdm) et Grasshopper (.gh) développés dans le cadre de ce mémoire sont accessibles via le code QR suivant :



Une notice d'instructions (.txt) et une image haute résolution du code (.png) sont également disponibles à titre informatif.

Descente de charges

Etape 1

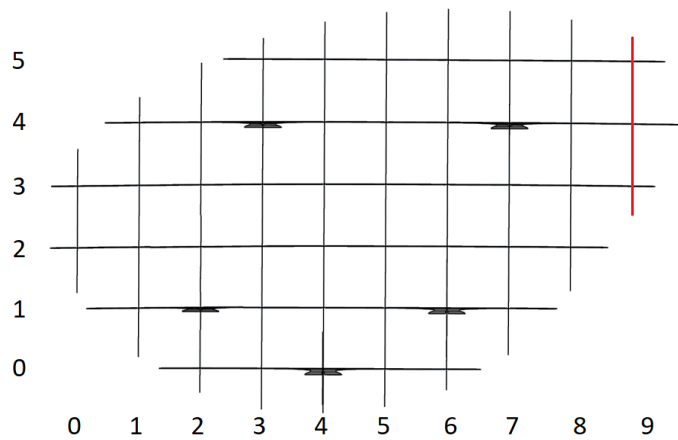


FIGURE 8.4

Poids Propre

5				0	0	0	0	0	0	0	0,038
4		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,125
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,038
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0			0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Charge 1

5				0	0	0	0	0	0	0	0,244
4		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,813
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,244
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0			0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Charge 2

5				0	0	0	0	0	0	0	1,3
4		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,3
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0			0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Etape 2

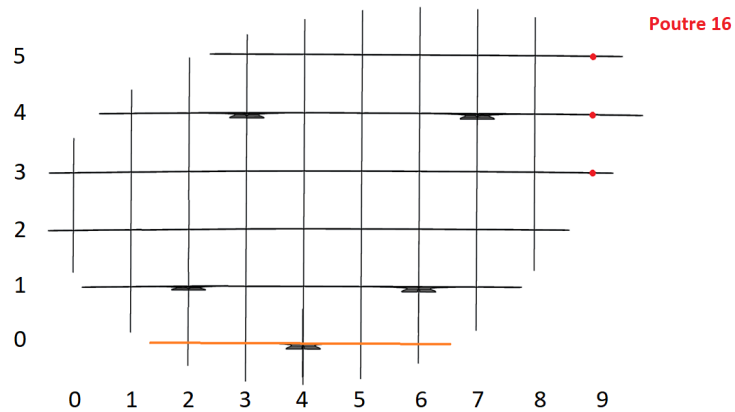


FIGURE 8.5

Poids Propre

5				0	0	0	0	0	0	0,038
4	0	0		0	0	0	0	0	0	0,125
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,038
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0				0,039	0,114	0,093	0,114	0,039		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 1

5				0	0	0	0	0	0	0,244
4	0	0		0	0	0	0	0	0	0,813
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,244
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0				0,255	0,743	0,603	0,743	0,255		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 2

5				0	0	0	0	0	0	1,3
4	0	0		0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,3
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0				1,323	0,186	0,882	0,186	1,323		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Etape 3

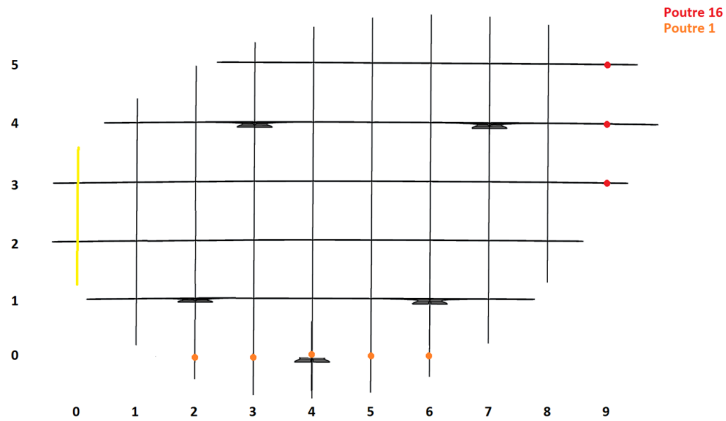


FIGURE 8.6

Poids Propre

5				0	0	0	0	0	0	0,038
4		0	0	0	0	0	0	0	0	0,125
3	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0,038
2	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1		0	0	0	0	0	0	0	0	0
0			0,039	0,114	0,093	0,114	0,039			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 1

5			0	0	0	0	0	0	0	0,244
4		0	0	0	0	0	0	0	0	0,813
3	0,325	0	0	0	0	0	0	0	0	0,244
2	0,325	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1		0	0	0	0	0	0	0	0	0
0			0,255	0,743	0,603	0,743	0,255			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 2

5				0	0	0	0	0	0	1,3
4		0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0,975	0	0	0	0	0	0	0	0	1,3
2	0,975	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1		0	0	0	0	0	0	0	0	0
0			1,323	0,186	0,882	0,186	1,323			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Etape 4

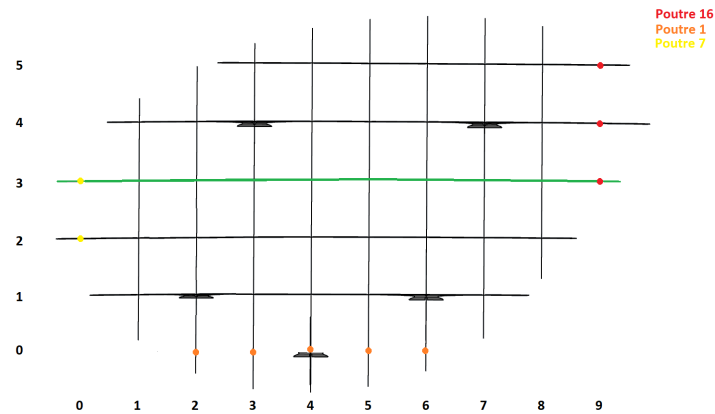


FIGURE 8.7

Poids Propre

5				0	0	0	0	0	0	0,038
4		0	0	0	0	0	0	0	0	0,125
3	0,05	0,153	0,033	0,118	0,096	0,098	0,112	0,052	0,126	0,038
2	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	
1		0	0	0	0	0	0	0	0	
0			0,039	0,114	0,093	0,114	0,039			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 1

5			0	0	0	0	0	0	0	0,244
4		0	0	0	0	0	0	0	0	0,813
3	0,325	0,993	0,215	0,765	0,625	0,636	0,730	0,345	0,810	0,244
2	0,325	0	0	0	0	0	0	0	0	
1		0	0	0	0	0	0	0	0	
0			0,255	0,743	0,603	0,743	0,255			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 2

5				0	0	0	0	0	0	1,3
4		0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0,975	3,004	0	0	1,035	0,602	0	0	3,484	1,3
2	0,975	0	0	0	0	0	0	0	0	
1		0	0	0	0	0	0	0	0	
0			1,323	0,186	0,882	0,186	1,323			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Etape 5

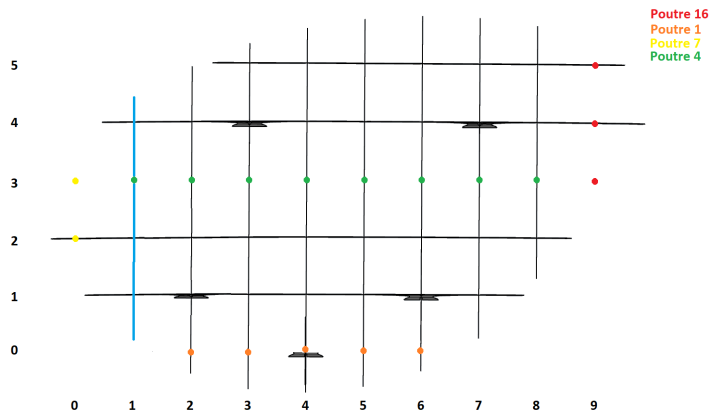


FIGURE 8.8

Poids Propre

5				0	0	0	0	0	0	0,038
4		0,152	0	0	0	0	0	0	0	0,125
3	0,05	0,153	0,033	0,118	0,096	0,098	0,112	0,052	0,126	0,038
2	0,05	0,302	0	0	0	0	0	0	0	
1		0	0	0	0	0	0	0		
0			0,039	0,114	0,093	0,114	0,039			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 1

5				0	0	0	0	0	0	0,244
4		0,984	0	0	0	0	0	0	0	0,813
3	0,325	0,993	0,215	0,765	0,625	0,636	0,730	0,345	0,810	0,244
2	0,325	1,959	0	0	0	0	0	0	0	
1		0	0	0	0	0	0	0		
0			0,255	0,743	0,603	0,743	0,255			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 2

5				0	0	0	0	0	0	1,3
4		2,549	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0,975	3,004	0	0	1,035	0,602	0	0	3,484	1,3
2	0,975	3,238	0	0	0	0	0	0	0	
1		0,467	0	0	0	0	0	0		
0			1,323	0,186	0,882	0,186	1,323			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Etape 6

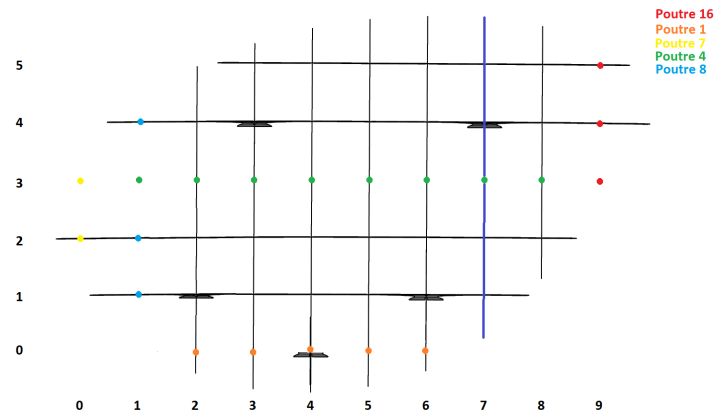


FIGURE 8.9

Poids Propre

5				0	0	0	0	0,012	0	0,038
4		0,152	0	0	0	0	0	0,214	0	0,125
3	0,05	0,153	0,033	0,118	0,096	0,098	0,112	0,052	0,126	0,038
2	0,05	0,302	0	0	0	0	0	0,214	0	
1		0	0	0	0	0	0	0,012		
0			0,039	0,114	0,093	0,114	0,039			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 1

5				0	0	0	0	0,077	0	0,244
4		0,984	0	0	0	0	0	1,395	0	0,813
3	0,325	0,993	0,215	0,765	0,625	0,636	0,730	0,345	0,810	0,244
2	0,325	3,959	0	0	0	0	0	1,395	0	
1		0	0	0	0	0	0	0,077		
0			0,255	0,743	0,603	0,743	0,255			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 2

5				0	0	0	0	1,158	0	1,3
4		2,549	0	0	0	0	0	0,792	0	0
3	0,975	3,004	0	0	1,035	0,602	0	0	3,484	1,3
2	0,975	3,238	0	0	0	0	0	0,792	0	
1		0,467	0	0	0	0	0	1,158		
0			1,323	0,186	0,882	0,186	1,323			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Etape 7

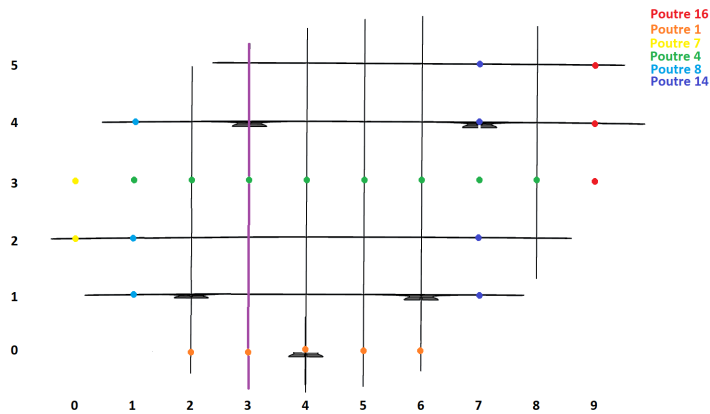


FIGURE 8.10

Poids Propre

5				0	0	0	0	0,012	0	0,038
4		0,152	0	0,413	0	0	0	0,214	0	0,125
3	0,05	0,153	0,033	0,118	0,096	0,098	0,112	0,052	0,126	0,038
2	0,05	0,302	0	0,983	0	0	0	0,214	0	
1		0	0	0,236	0	0	0	0,012		
0			0,039	0,114	0,093	0,114	0,039			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 1

5				0	0	0	0	0,077	0	0,244
4		0,984	0	1,744	0	0	0	1,395	0	0,813
3	0,325	0,993	0,215	0,765	0,625	0,636	0,730	0,345	0,810	0,244
2	0,325	3,959	0	0,757	0	0	0	1,395	0	
1		0	0	1,608	0	0	0	0,077		
0			0,255	0,743	0,603	0,743	0,255			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 2

5				1,146	0	0	0	1,158	0	1,3
4		2,549	0	0,827	0	0	0	0,792	0	0
3	0,975	3,004	0	0	1,035	0,602	0	0	3,484	1,3
2	0,975	3,238	0	0,549	0	0	0	0,792	0	
1		0,467	0	1,564	0	0	0	1,158		
0			1,323	0,186	0,882	0,186	1,323			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Etape 8

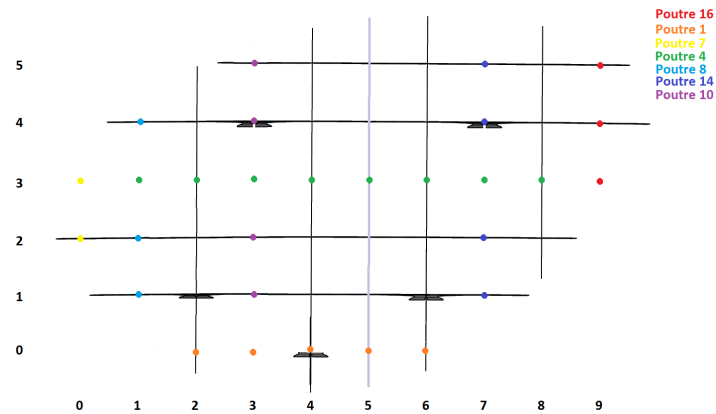


FIGURE 8.11

Poids Propre

5					0	0	0	0,012	0	0,038
4		0,152	0	0,413	0	0,265	0	0,214	0	0,125
3	0,05	0,153	0,033	0,118	0,096	0,098	0,112	0,052	0,126	0,038
2	0,05	0,302	0	0,983	0	0,037	0	0,214	0	
1		0	0	0,236	0	0,41	0	0,012		
0			0,039	0,114	0,093	0,114	0,039			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 1

5					0	0	0	0,077	0	0,244
4		0,984	0	1,744	0	1,695	0	1,395	0	0,813
3	0,325	0,993	0,215	0,765	0,625	0,636	0,730	0,345	0,810	0,244
2	0,325	3,959	0	0,757	0	0,644	0	1,395	0	
1		0	0	1,608	0	1,640	0	0,077		
0			0,255	0,743	0,603	0,743	0,255			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 2

5				1,146	0	1,034	0	1,158	0	1,3
4		2,549	0	0,827	0	1,241	0	0,792	0	0
3	0,975	3,004	0	0	1,035	0,602	0	0	3,484	1,3
2	0,975	3,238	0	0,549	0	0,963	0	0,792	0	
1		0,467	0	1,564	0	1,451	0	1,158		
0			1,323	0,186	0,882	0,186	1,323			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Etape 9

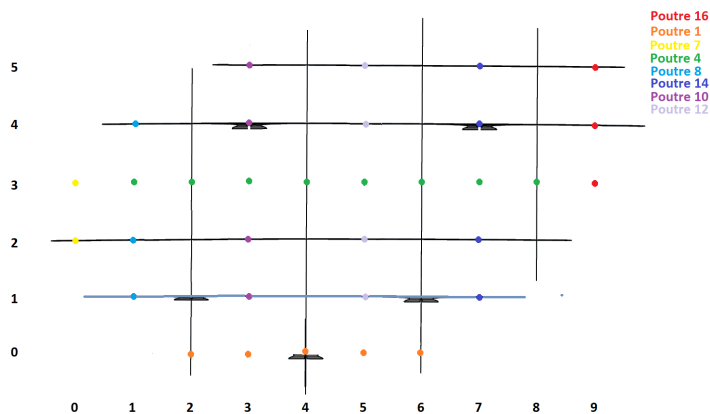


FIGURE 8.12

Poids Propre

5				0	0	0	0	0,012	0	0,038
4		0,152	0	0,413	0	0,265	0	0,214	0	0,125
3	0,05	0,153	0,033	0,118	0,096	0,098	0,112	0,052	0,126	0,038
2	0,05	0,302	0	0,983	0	0,037	0	0,214	0	0
1		0	0,271	0,236	0,61	0,41	3,423	0,012	0	
0			0,039	0,114	0,093	0,114	0,039			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 1

5				0	0	0	0	0,077	0	0,244
4		0,984	0	1,744	0	1,695	0	1,395	0	0,813
3	0,325	0,993	0,215	0,765	0,625	0,636	0,730	0,345	0,810	0,244
2	0,325	3,959	0	0,757	0	0,644	0	1,395	0	
1		0	1,89	1,608	3,312	1,640	2,023	0,077		
0			0,255	0,743	0,603	0,743	0,255			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 2

5				1,146	0	1,034	0	1,158	0	1,3
4		2,549	0	0,827	0	1,241	0	0,792	0	0
3	0,975	3,004	0	0	1,035	0,602	0	0	3,484	1,3
2	0,975	3,238	0	0,549	0	0,963	0	0,792	0	
1		0,467	4,166	1,564	0,528	1,451	5,145	1,158		
0			1,323	0,186	0,882	0,186	1,323			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Etape 10

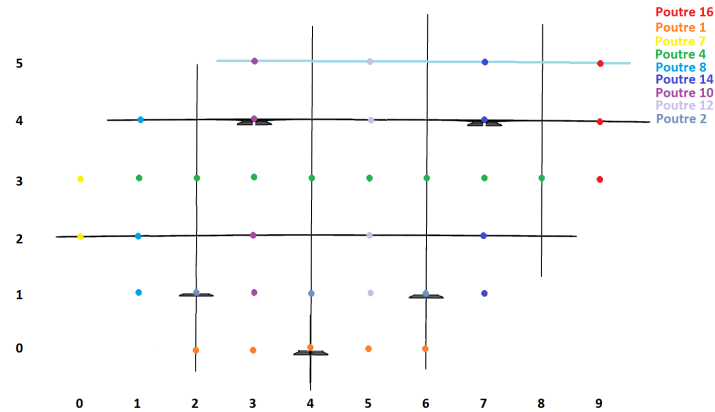


FIGURE 8.13

Poids Propre

5				0,216	0	0,155	0,012	0,279	0,038	
4		0,152	0	0,413	0	0,265	0	0,214	0	0,125
3	0,05	0,153	0,033	0,118	0,096	0,098	0,112	0,052	0,126	0,038
2	0,05	0,302	0	0,983	0	0,037	0	0,214	0	0
1		0	0,271	0,236	0,61	0,41	3,423	0,012	0	
0			0,039	0,114	0,093	0,114	0,039			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 1

5				0	1,405	0	1,008	0,077	1,809	0,244
4		0,984	0	1,744	0	1,695	0	1,395	0	0,813
3	0,325	0,993	0,215	0,765	0,625	0,636	0,730	0,345	0,810	0,244
2	0,325	3,959	0	0,757	0	0,644	0	1,395	0	
1		0	1,89	1,608	3,312	1,640	2,023	0,077		
0			0,255	0,743	0,603	0,743	0,255			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 2

5				1,146	4,772	1,034	0	1,158	5,065	1,3
4		2,549	0	0,827	0	1,241	0	0,792	0	0
3	0,975	3,004	0	0	1,035	0,602	0	0	3,484	1,3
2	0,975	3,238	0	0,549	0	0,963	0	0,792	0	
1		0,467	4,166	1,564	0,528	1,451	5,145	1,158		
0			1,323	0,186	0,882	0,186	1,323			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Etape 11

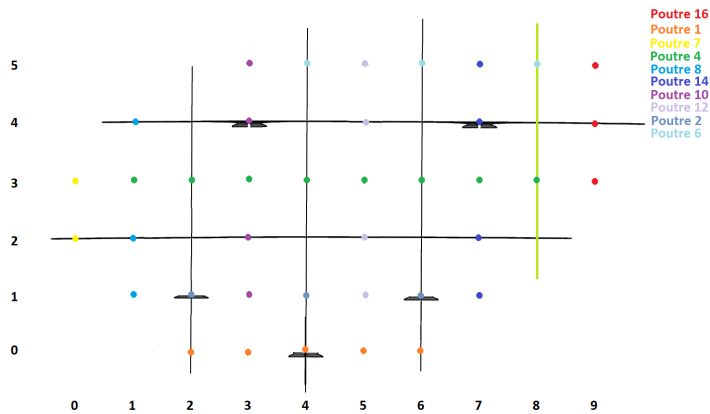


FIGURE 8.14

Poids Propre

5					0,216	0	0,155	0,012	0,279	0,038
4		0,152	0	0,413	0	0,265	0	0,214	0,706	0,125
3	0,05	0,153	0,033	0,118	0,096	0,098	0,112	0,052	0,126	0,038
2	0,05	0,302	0	0,983	0	0,037	0	0,214	0	
1		0	0,271	0,236	0,61	0,41	3,423	0,012		
0			0,039	0,114	0,093	0,114	0,039			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 1

5				0	1,405	0	1,008	0,077	1,809	0,244
4		0,984	0	1,744	0	1,695	0	1,395	4,581	0,813
3	0,325	0,993	0,215	0,765	0,625	0,636	0,730	0,345	0,810	0,244
2	0,325	3,959	0	0,757	0	0,644	0	1,395	0	
1		0	1,89	1,608	3,312	1,640	2,023	0,077		
0			0,255	0,743	0,603	0,743	0,255			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 2

5				1,146	4,772	1,034	0	1,158	5,065	1,3
4		2,549	0	0,827	0	1,241	0	0,792	11,777	0
3	0,975	3,004	0	0	1,035	0,602	0	0	3,484	1,3
2	0,975	3,238	0	0,549	0	0,963	0	0,792	0,022	
1		0,467	4,166	1,564	0,528	1,451	5,145	1,158		
0			1,323	0,186	0,882	0,186	1,323			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Etape 12

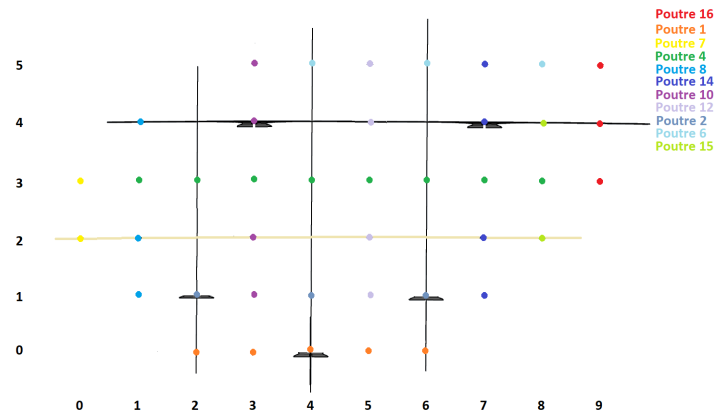


FIGURE 8.15

Poids Propre

5				0	0,216	0	0,155	0,012	0,279	0,038
4		0,152	0	0,413	0	0,265	0	0,214	0,706	0,125
3	0,05	0,153	0,033	0,118	0,096	0,098	0,112	0,052	0,126	0,038
2	0,05	0,302	1,451	0,983	0,189	0,037	0,746	0,214	0	
1		0	0,271	0,236	0,61	0,41	3,423	0,012		
0			0,039	0,114	0,093	0,114	0,039			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 1

5				0	1,405	0	1,008	0,077	1,809	0,244
4		0,984	0	1,744	0	1,695	0	1,395	4,581	0,813
3	0,325	0,993	0,215	0,765	0,625	0,636	0,730	0,345	0,810	0,244
2	0,325	3,959	5,916	0,757	0	0,644	4,364	1,395	0	
1		0	1,89	1,608	3,312	1,640	2,023	0,077		
0			0,255	0,743	0,603	0,743	0,255			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 2

5				1,146	4,772	1,034	0	1,158	5,065	1,3
4		2,549	0	0,827	0	1,241	0	0,792	11,777	0
3	0,975	3,004	0	0	1,035	0,602	0	0	3,484	1,3
2	0,975	3,238	9,203	0,549	0	0,963	3,836	0,792	0,022	
1		0,467	4,166	1,564	0,528	1,451	5,145	1,158		
0			1,323	0,186	0,882	0,186	1,323			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Etape 13

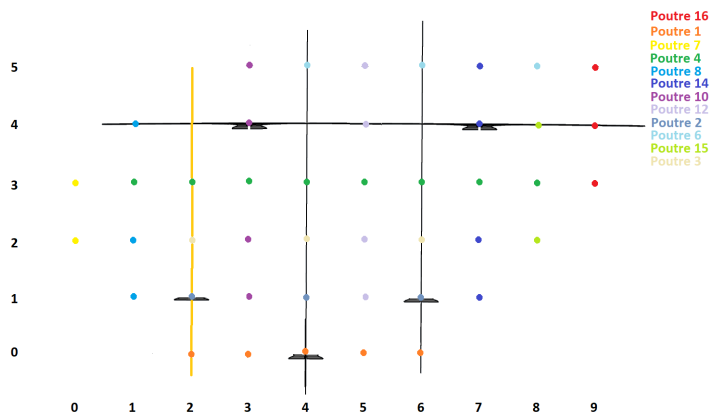


FIGURE 8.16

Poids Propre

5			0	0,216	0	0,155	0,012	0,279	0,038
4	0,152	0,626	0,413	0	0,265	0	0,214	0,706	0,125
3	0,05	0,153	0,033	0,118	0,096	0,098	0,112	0,052	0,126
2	0,05	0,302	1,451	0,983	0,189	0,037	0,746	0,214	0
1		0	1,568	0,236	0,61	0,41	3,423	0,012	
0			0,039	0,114	0,093	0,114	0,039		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8

Charge 1

5			0	1,405	0	1,008	0,077	1,809	0,244
4	0,984	2,897	1,744	0	1,695	0	1,395	4,581	0,813
3	0,325	0,993	0,215	0,765	0,625	0,636	0,730	0,345	0,810
2	0,325	3,959	5,916	0,757	0	0,644	4,364	1,395	0
1		0	7,980	1,608	3,312	1,640	2,023	0,077	
0			0,255	0,743	0,603	0,743	0,255		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8

Charge 2

5			1,146	4,772	1,034	0	1,158	5,065	1,3
4	2,549	3,927	0,827	0	1,241	0	0,792	11,777	0
3	0,975	3,004	0	0	1,035	0,602	0	0	3,484
2	0,975	3,238	9,203	0,549	0	0,963	3,836	0,792	0,022
1		0,467	14,666	1,564	0,528	1,451	5,145	1,158	
0			1,323	0,186	0,882	0,186	1,323		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8

Etape 14

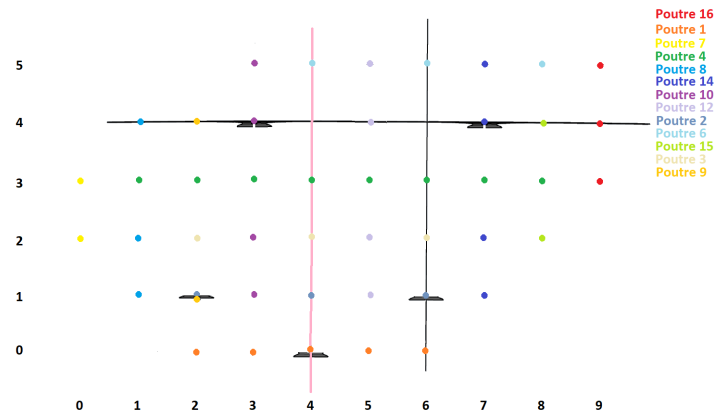


FIGURE 8.17

Poids Propre

5					0,216	0	0,155	0,012	0,279	0,038
4		0,152	0,626	0,413	0,902	0,265	0	0,214	0,706	0,125
3	0,05	0,153	0,033	0,118	0,096	0,098	0,112	0,052	0,126	0,038
2	0,05	0,302	1,451	0,983	0,189	0,037	0,746	0,214	0	
1		0	1,568	0,236	0,61	0,41	3,423	0,012		
0			0,039	0,114	0,802	0,114	0,039			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 1

5				0	1,405	0	1,008	0,077	1,809	0,244
4		0,984	2,897	1,744	5,084	1,695	0	1,395	4,581	0,813
3	0,325	0,993	0,215	0,765	0,625	0,636	0,730	0,345	0,810	0,244
2	0,325	3,959	5,916	0,757	0	0,644	4,364	1,395	0	
1		0	7,980	1,608	3,312	1,640	2,023	0,077		
0			0,255	0,743	4,111	0,743	0,255			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 2

5				1,146	4,772	1,034	0	1,158	5,065	1,3
4		2,549	3,927	0,827	9,718	1,241	0	0,792	11,777	0
3	0,975	3,004	0	0	1,035	0,602	0	0	3,484	1,3
2	0,975	3,238	9,203	0,549	0	0,963	3,836	0,792	0,022	
1		0,467	14,666	1,564	0,528	1,451	5,145	1,158		
0			1,323	0,186	2,050	0,186	1,323			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Etape 15

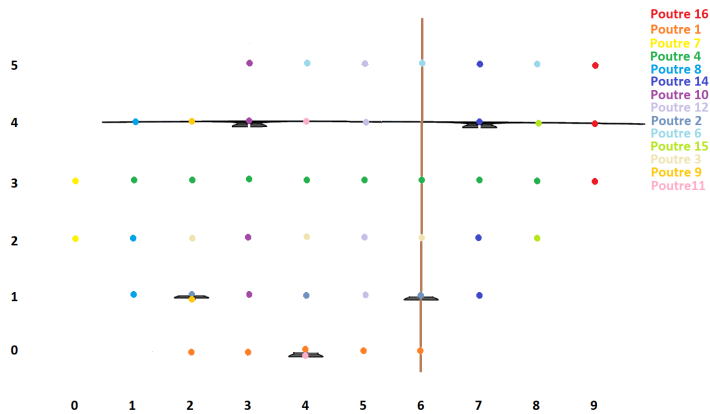


FIGURE 8.18

Poids Propre

5					0,216	0	0,155	0,012	0,279	0,038
4		0,152	0,626	0,413	0,902	0,265	0,767	0,214	0,706	0,125
3	0,05	0,153	0,033	0,118	0,096	0,098	0,112	0,052	0,126	0,038
2	0,05	0,302	1,451	0,983	0,189	0,037	0,746	0,214	0	
1		0	1,568	0,236	0,61	0,41	1,161	0,012		
0			0,039	0,114	0,802	0,114	0,039			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 1

5				0	1,405	0	1,008	0,077	1,809	0,244
4		0,984	2,897	1,744	5,084	1,695	4,824	1,395	4,581	0,813
3	0,325	0,993	0,215	0,765	0,625	0,636	0,730	0,345	0,810	0,244
2	0,325	3,959	5,916	0,757	0	0,644	4,364	1,395	0	
1		0	7,980	1,608	3,312	1,640	6,805	0,077		
0			0,255	0,743	4,111	0,743	0,255			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 2

5				1,146	4,772	1,034	0	1,158	5,065	1,3
4		2,549	3,927	0,827	9,718	1,241	3,113	0,792	11,777	0
3	0,975	3,004	0	0	1,035	0,602	0	0	3,484	1,3
2	0,975	3,238	9,203	0,549	0	0,963	3,836	0,792	0,022	
1		0,467	14,666	1,564	0,528	1,451	11,741	1,158		
0			1,323	0,186	2,050	0,186	1,323			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Etape 16

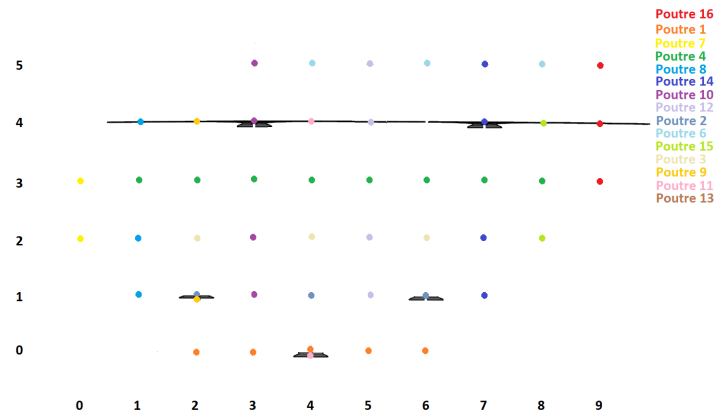


FIGURE 8.19

Poids Propre

5				0	0,216	0	0,155	0,012	0,279	0,038
4		0,152	0,626	2,58	0,902	0,265	0,767	2,41	0,706	0,125
3	0,05	0,153	0,033	0,118	0,096	0,098	0,112	0,052	0,126	0,038
2	0,05	0,302	1,451	0,983	0,189	0,037	0,746	0,214	0	
1		0	1,568	0,236	0,61	0,41	1,161	0,012		
0			0,039	0,114	0,802	0,114	0,039			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 1

5				0	1,405	0	1,008	0,077	1,809	0,244
4		0,984	2,897	13,757	5,084	1,695	4,824	15,461	4,581	0,813
3	0,325	0,993	0,215	0,765	0,625	0,636	0,730	0,345	0,810	0,244
2	0,325	3,959	5,916	0,757	0	0,644	4,364	1,395	0	
1		0	7,980	1,608	3,312	1,640	6,805	0,077		
0			0,255	0,743	4,111	0,743	0,255			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Charge 2

5				1,146	4,772	1,034	0	1,158	5,065	1,3
4		2,549	3,927	18,551	9,718	1,241	3,113	21,892	11,777	0
3	0,975	3,004	0	0	1,035	0,602	0	0	3,484	1,3
2	0,975	3,238	9,203	0,549	0	0,963	3,836	0,792	0,022	
1		0,467	14,666	1,564	0,528	1,451	11,741	1,158		
0			1,323	0,186	2,050	0,186	1,323			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

