
Vers une « Robonumérisation » de la construction ?

Sebastien Goessens¹, Caitlin Mueller², Pierre Lateur¹

¹ Université catholique de Louvain EPL/IMMC,
Pôle Génie Civil et Environnement,
place du levant 1 bte L5.05.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique,
sebastien.goessens@uclouvain.be

² Massachusetts Institute of Technology, Department of Architecture,
77 Massachusetts Ave, Cambridge, MA 02139, United States, caitlinm@mit.edu

RÉSUMÉ. Cet article a pour objectif de démontrer la faisabilité de la construction des ouvrages à l'aide de robots volants, plus communément appelés drones, sur base de la construction en vraie grandeur d'une colonne en béton. Il met en évidence les différents problèmes liés à ce mode constructif et les adaptations qui sont nécessaires, compte tenu des limites de positionnement dans l'espace et de la limitation des charges pouvant être transportées.

ABSTRACT. This article aims to demonstrate the feasibility of the construction of structures using flying robots, commonly called drones, based on the construction of a full-scale concrete column. It highlights the various problems associated with this construction method and the needed adaptations, given the positioning limits in space and limited loads to be transported.

MOTS-CLÉS : digital fabrication, robotic fabrication, additive manufacturing, drone.

KEY WORDS : digital fabrication, robotic fabrication, additive manufacturing, drone.



1. Introduction

Quelques révolutions ont marqué le monde de la construction lors de ces 5 derniers siècles :

- Des révolutions scientifiques, catalysées dès le 16^{ème} siècle par Galilée qui fut le premier à développer la résistance des matériaux ;
- Des révolutions sociales, qui ont permis aux travailleurs de bénéficier de conditions de travail acceptables, même si ce n'est pas encore le cas aujourd'hui en de nombreux endroits du globe ;
- Des révolutions industrielles, avec notamment l'avènement de l'acier au 19^{ème} siècle, l'utilisation systématique du béton armé dès le milieu du 20^{ème} siècle ou les développements fantastiques de la technologie des machines de chantier à la fin du 20^{ème} siècle ;
- Des révolutions certificatives (eurocodes, iso, systèmes qualités,...) garantissant une qualité minimale des matériaux produits, des études de stabilité, de la mise en œuvre, etc. ;
- Des révolutions informatiques, ayant totalement changé les méthodes de travail des bureaux d'études, des architectes, des maitres d'œuvre,...
- Le développement du « Building Information Modeling (BIM) », probablement la dernière révolution, en cours aujourd'hui même.

Malgré toutes ces révolutions, la rentabilité des projets de construction reste très aléatoire avec des marges bénéficiaires faibles, et ceci suite à différents facteurs : coût de la sécurité, facteurs humains, intempéries, manque de communication entre les différents intervenants, manque de main d'œuvre qualifiée,... il en résulte un surcoût qui peut atteindre jusqu'à 10% du coût de l'ouvrage.

Cette constatation nous mène à envisager une prochaine révolution : la « robonumérisation » de la construction. Elle devrait permettre d'augmenter sensiblement la rapidité et la qualité de la construction, en reliant des modèles BIM à un essaim de robots parfaitement coordonnés qui construiront l'ouvrage de manière automatisée ou semi-automatisée.

Le monde de l'industrie connaît depuis quelques années une révolution liée au développement des imprimantes 3D qui sont capables de produire des pièces mécaniques complexes et précises. Cette technologie est actuellement transposée au domaine de la construction, où des imprimantes 3D expérimentales tentent de fabriquer des bâtiments à taille réelle. Elle est toutefois limitée par la taille, puisque l'imprimante devient elle-même une construction plus grande que ce qu'elle construit, ce qui comporte un désavantage d'encombrement.

En s'inspirant d'exemples du règne animal (figure 1), cette recherche propose un nouveau type de robotisation de la construction. Depuis des millénaires, les hirondelles construisent leurs nids en effectuant sans cesse des allers-retours pour transporter et assembler des brindilles et de la terre afin de former des structures robustes capable de supporter des œufs et des nouveaux nés. D'autres animaux volants utilisent des méthodes similaires pour construire des structures de forme complexes.



Figure 1. Quelques exemples de la nature montrant des animaux volants capables de construire des structures robustes pouvant supporter le poids des œufs, des nouveau-nés, du miel, ...

S'inspirant des animaux, ce projet de recherche vise à développer et proposer de nouvelles méthodes de construction en utilisant des robots volants (plus communément appelés drones, UAV (Unmanned Aerial Vehicle) UAS (Unmanned Aerial System), etc.) équipés pour construire des structures de manière plus sécuritaire, plus rapide, avec une meilleure coordination et avec un niveau de précision élevé.

2. Processus de conception et de construction d'une structure à l'aide de drones

L'utilisation de drones pour la construction d'un ouvrage a de nombreuses implications sur l'ensemble du processus allant de la conception jusqu'à la réalisation. Il ne s'agit pas simplement de remplacer en fin de processus l'ouvrier par un drone, mais bien de proposer de nouveaux modes de conception et de construction.

L'une des dernières grandes avancées dans le domaine de la construction est le développement du BIM, qui consiste à rassembler autour d'un modèle 3D unique l'ensemble des informations concernant un ouvrage, permettant ainsi une meilleure coordination entre les différents intervenants d'un projet. Toutefois, le BIM ne dispense pas, encore aujourd'hui, de passer par l'étape de production des plans d'exécution qui sont utilisés sur chantier par les équipes d'ouvriers.

Or, cette phase de production de plans pourrait s'avérer inutile comme le montre la figure 2. Lors de la conception du projet, les ingénieurs et les architectes mettent au point un modèle CAD (Computer-Aided Design)/BIM de l'ouvrage et les différents intervenants (techniques spéciales, sous-traitants, fabricants, etc.) complètent ensuite ce modèle. Ce dernier pourrait alors être directement traduit en instructions envoyées aux drones bâtisseurs.

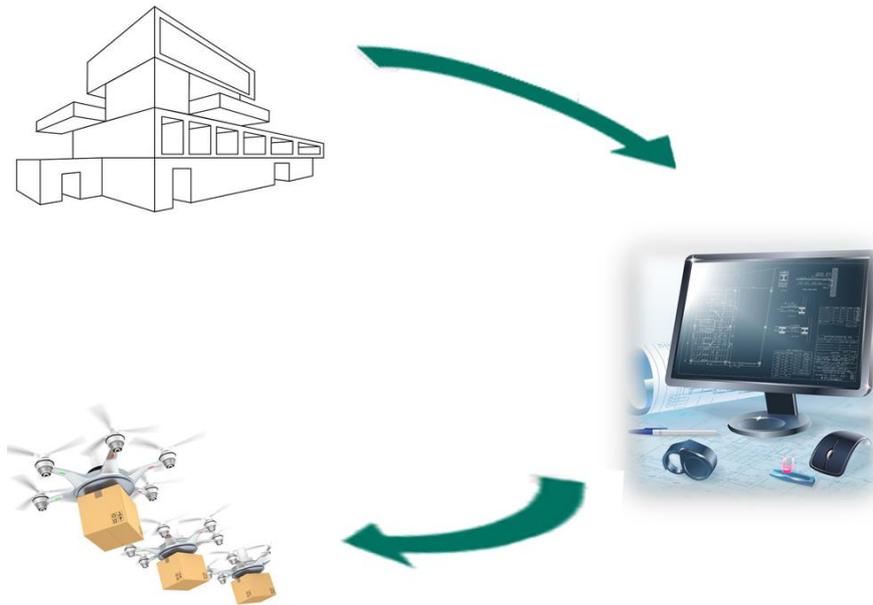


Figure 2. *Processus "Design and Built drone compatible".*

3. Les éléments de construction "drone-compatibles"

Un drone de taille raisonnable ne pourra probablement jamais soulever des charges de plusieurs tonnes. Actuellement, il est possible de fabriquer des drones de taille et de bruit limités ayant néanmoins une charge utile de 100 kg, et, avec l'évolution des technologies (moteurs, hélices, batteries, etc.), cette charge utile ira probablement en grandissant au fil du temps.

Une capacité portante de 100 kg est suffisante pour transporter l'ensemble des éléments nécessaires à la construction du gros œuvre de nombreux ouvrages. Il est aussi envisageable d'utiliser plusieurs drones travaillant ensemble pour déplacer des éléments de plus grande taille.

La limitation du poids transporté nous conduit donc à revoir certains modes constructifs afin de permettre une construction des ouvrages à partir de petits éléments légers, ce qui pourrait sembler contradictoire avec la situation actuelle qui privilégie plutôt la mise en place d'éléments de grande taille avec de grosses grues. Toutefois, cette réalité est dictée par des facteurs économiques liés au coût de la main d'œuvre, qui perdent donc leur pertinence dans le cadre de l'utilisation de robots.

4. Validation expérimentale de la faisabilité de la construction à l'aide de drones

4.1. Objectifs des essais

Des études expérimentales visant à démontrer la faisabilité de la construction d'ouvrages à l'aide de drones ont déjà été réalisées. D'abord en 2011 à l'université de Pennsylvanie, où une équipe de chercheurs a utilisé des petits drones pour assembler des pièces aimantées [LIN 11]. Ensuite, à l'Université de Zurich, où des drones ont été utilisés en indoor pour construire une tour de 6 m de hauteur composée de « briques » en polystyrène [AUG 14]. Ces études sont concluantes, notamment concernant le guidage automatique des drones à partir d'une interface software. De nombreux développements sont toutefois encore nécessaires avant de pouvoir utiliser des drones pour des constructions réelles composées de matériaux plus lourds nécessitant des modes d'assemblage adaptés.

Une première étape indispensable de cette recherche concerne la faisabilité de la construction d'un élément structural simple comme une colonne constituée d'éléments en béton, d'une masse d'environ 20 kg chacun.

4.2. Le drone utilisé

Le drone utilisé pour les essais présentés dans cette publication est un quadricoptère X8 équipé de huit moteurs électriques de 2 kW chacun, avec huit hélices de trente pouces. Ce drone, fabriqué sur mesure, pèse environ 12 kg à vide (avec deux batteries) pour une charge utile de 40 kg et une autonomie à vide d'environ une heure (sachant que l'autonomie des batteries LiPo dépend fortement de la T°). Ses dimensions générales sont données à la figure 3.

Il est aisément possible d'augmenter la charge utile de ce drone moyennant les modifications suivantes :

- Augmentation du voltage des batteries (passer de 44V à 52V) ;
- Placement de moteurs plus puissants ;
- Remplacement des hélices bipales par des hélices tripales.

Ces modifications pourraient toutefois avoir un impact sur l'autonomie de l'appareil.



Figure 3. Drone fabriqué sur mesure, ayant une charge utile de 40 kg.

4.3. Construction d'une colonne de béton au moyen d'un drone

Tout comme les blocs de maçonnerie utilisés sur chantier sont adaptés de par leur géométrie, leur taille et leur poids aux ouvriers qui doivent les mettre en œuvre, les éléments à placer par des drones doivent également être adaptés aux caractéristiques et capacités de ceux-ci. Bien que la charge utile soit moins limitante que pour un humain, les drones ont cependant d'autres contraintes. L'une d'entre elles est certainement la difficulté de les positionner de manière précise dans l'espace et selon les six degrés de liberté (trois translations et trois rotations). Des systèmes existent déjà : positionnement par camera et analyse d'image, utilisation d'une station totale de géomètre, GPS-RTK (Real Time Kinematic), télémétrie laser,... et la technologie évolue très vite dans ce domaine.

Dans l'état actuel des choses, il est difficile de concevoir qu'un drone puisse placer un simple bloc de maçonnerie aussi précisément qu'un humain, ne serait-ce que par la présence de vent sur le chantier. Les éléments de construction « drone-compatibles » doivent donc avoir une géométrie adaptée permettant de compenser ce manque de précision.

Quantifier la précision de positionnement que peut atteindre un drone n'est pas chose aisée car, d'une part, celle-ci peut se marquer dans 3 directions et selon 3 angles de rotation, et, d'autre part, elle dépend de plusieurs paramètres :

- le type d'environnement (extérieur / intérieur) ;
- la présence d'éléments pouvant perturber les capteurs du drone (des masses métalliques perturbent le compas) ;
- le type de système de positionnement ;
- la météo (vent, rafales, température, etc.) ;
- le type de drone utilisé ainsi que les outils qui l'équipent.

Pour la première campagne expérimentale, des blocs circulaires empilables ont été conçus afin de fabriquer des colonnes en béton. L'utilisation de ces blocs axisymétriques permet d'évaluer l'imprécision latérale sans devoir tenir compte de l'imprécision angulaire du drone. Les dimensions des blocs fabriqués ainsi que leur tolérance de pose sont donnés en figure 4.

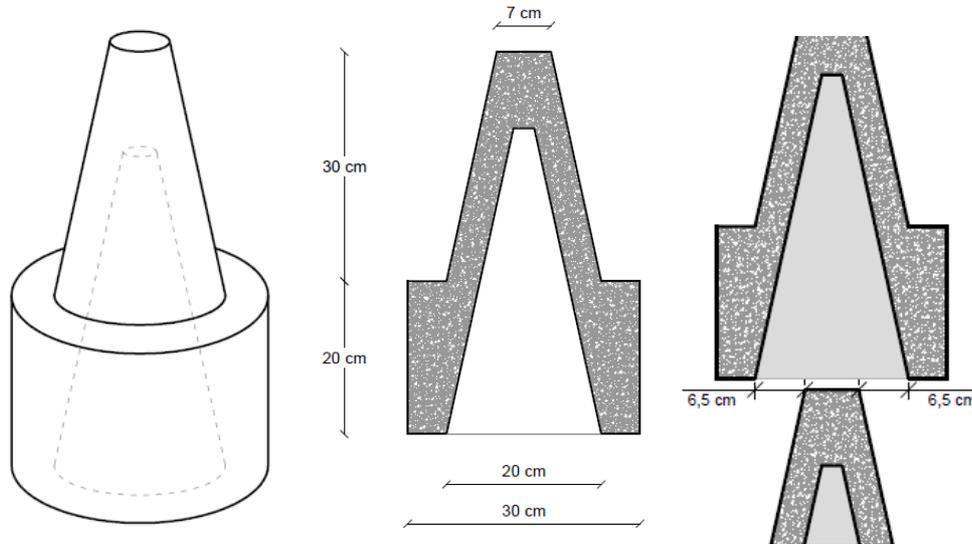


Figure 4. Blocs circulaire drone-compatibles utilisés pour la construction d'une colonne en béton.

La limitation du poids transporté est un critère prépondérant pour la construction d'ouvrages avec des robots volants. Un travail est donc effectué afin de limiter au maximum le poids des blocs tout en préservant les caractéristiques mécaniques nécessaires à la réalisation des structures souhaitées. Les blocs fabriqués sont notamment composés de béton et d'Argex et ont un poids allant de 15 à 20 kg en fonction des mélanges testés. Le tableau 1 reprend les compositions ainsi que les résistances de bétons utilisés pour fabriquer les blocs.

Tableau 1. Compositions des blocs en bétons.

	Gravier	Argex	Sable	Argex Concassé	Frigolite	Ciment CEM I 52,5 R	Eau	γ [kg/m^3]	f_{ck} [MPa]	P [kg]
Béton classique	4 kg		2 kg			1 kg	0,5 kg	2200	20 - 40	31
Composition 1		0,4 kg	1 kg			1 kg	0,3 kg	1700	26,6	22
Composition 2				2 kg		1 kg	0,7 kg	1400	28,2	20
Composition 3		0,3 kg		1,3 kg		1 kg	0,6 kg	1300	13	18
Composition 4		0,4 kg		0,8 kg	1 Litre	1 kg	0,6 kg	1000	7,6	14

¹ f_{ck} : la résistance à la compression sur cube de 15cm à 21 jours.

² P : Poids d'un bloc

Le drone est équipé d'un cône de guidage (voir figure 3 et 5) muni en son centre d'un électroaimant, lui permettant d'agripper et de déplacer blocs, ceux-ci étant munis d'une plaque métallique en partie supérieure. Un dispositif à ressorts placé entre le drone et le cône évalue la charge suspendue afin d'assurer la sécurité du décrochage du bloc : la coupure de l'alimentation de l'électroaimant ne pouvant intervenir qu'une fois la pose effective du bloc soit, lorsque son poids apparent est annulé.



Figure 5. Réalisation d'une colonne en béton avec un drone.

Les essais d'empilement des blocs avec le drone (figure 5) ont été réalisés en intérieur avec pilotage manuel du drone. Lors des essais, le pilote a pu aisément prendre les blocs avec le drone et les empiler les uns sur les autres. On peut dès lors noter que la tolérance latérale de pose de 6,5 cm (voir figure 4) est suffisante pour assembler les blocs lors d'un pilotage manuel en l'absence de vent. Pour un pilotage automatique aux instruments, on peut s'attendre à une précision plus grande. Cependant, des essais en extérieur devront être réalisés afin de valider la tolérance de pose nécessaire. Si un besoin de plus de latitude sur le positionnement s'avère nécessaire, il est possible de développer de nouveaux blocs avec une géométrie permettant une imprécision latérale de 9 cm (figure 6).

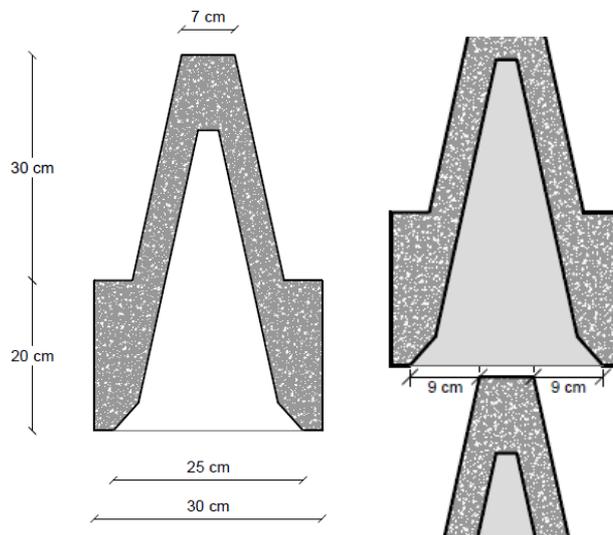


Figure 6. Blocs circulaires drone-compatibles avec une tolérance de pose de 9 cm.

La rigidité du système permettant au drone de transporter le bloc influence considérablement le comportement en vol de celui-ci, ainsi que la facilité de pose du bloc. Comme schématisé à la figure 7, une fixation trop rigide du bloc aura pour conséquence d'induire au drone un moment de rappel important lorsque celui-ci s'inclinera pour se déplacer latéralement, avec pour conséquence d'entraver son bon déplacement, mais également de solliciter de manière trop importante certains moteurs du drone au risque de les endommager. Une fixation trop peu rigide aura quant à elle pour effet de laisser le bloc se balancer, ce qui déstabilisera également le drone, l'empêchera de se déplacer correctement et nécessitera une tolérance de pose beaucoup plus grande pour le bloc. Il sera dès lors nécessaire de tester différents types de fixation ayant des rigidités adaptées aux blocs transportés par le drone.

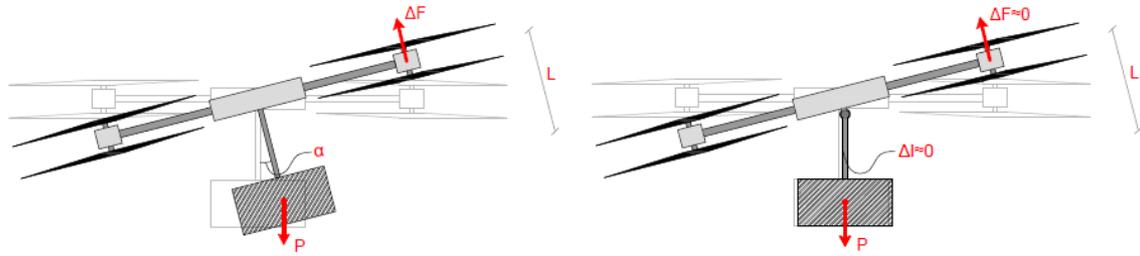


Figure 7. Influence de la rigidité du système de fixation des blocs sous le drone.

5. Automatisation du processus

Comme expliqué précédemment, l'objectif de cette recherche est de proposer in fine un processus de construction par drone entièrement automatisé dans lequel les instructions envoyées au drone ne se feront plus via un pilote, mais directement par un ordinateur qui traduira le modèle BIM de l'ouvrage et enverra les instructions nécessaires au drone.

L'utilisation du logiciel Dynamo permet déjà de traduire des géométries simples dessinées dans un logiciel CAD en instructions pour drones. La première étape de ce processus consiste à transformer les volumes dessinés en unités de constructions drone compatible (figure 8). La seconde étape, également effectuée au moyen du logiciel Dynamo, consiste à transformer cet ensemble d'unités drone-compatibles en instructions de pose pour les drones bâtisseurs. Lors de cette seconde étape, le logiciel choisit un ordre de pose pour l'ensemble des éléments qui composent la structure. Il vérifie ensuite la stabilité locale et globale de la structure en construction lors de la pose de chaque élément successif, et adapte si nécessaire l'ordre de pose afin de garantir cette stabilité. Finalement, le logiciel Dynamo ressort un plan de vol pour le drone indiquant l'ordre des blocs à placer, l'endroit où aller chercher ces blocs, l'itinéraire à suivre ainsi que la vitesse de déplacement.

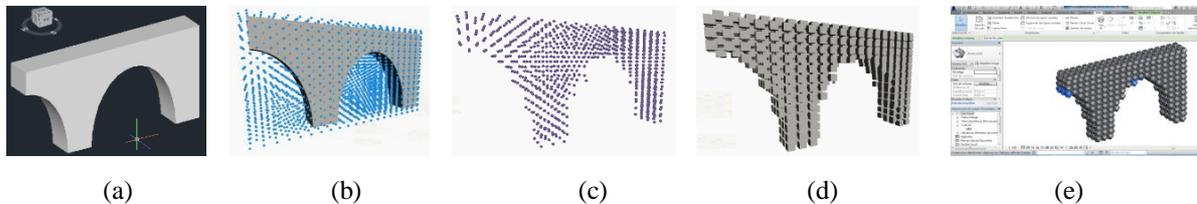


Figure 8. (a) Modélisation de la structure dans un logiciel CAD, (b), (c) et (d) Transformation du volume en unités de construction drone compatible via le logiciel Dynamo, (e) Export de la structure composée des éléments de construction drone compatible dans le logiciel Revit afin de visualiser la structure et d'éventuellement modifier celle-ci.

6. Quelques considérations sur le coût de la construction maçonnée

La figure 9 ci-dessous illustre la construction d'un mur maçonné de 16 m². Nos essais nous permettent d'estimer qu'un maximum de deux heures est nécessaire pour le construire avec des drones. Sur la base d'une évaluation du prix d'achat d'un drone, de sa durée de vie, du tarif diurne de l'électricité, du coût de la maintenance et de la supervision, de la pose d'un mortier ou d'une colle, on estime que le prix du placement de cette maçonnerie pourrait être de 4 euros par mètre carré, ce qui est 10 fois moins élevé que le coût horaire d'un ouvrier belge. Cette estimation grossière doit être affinée pour tenir compte d'autres facteurs comme par exemple le coût de production de ce nouveau type de blocs.

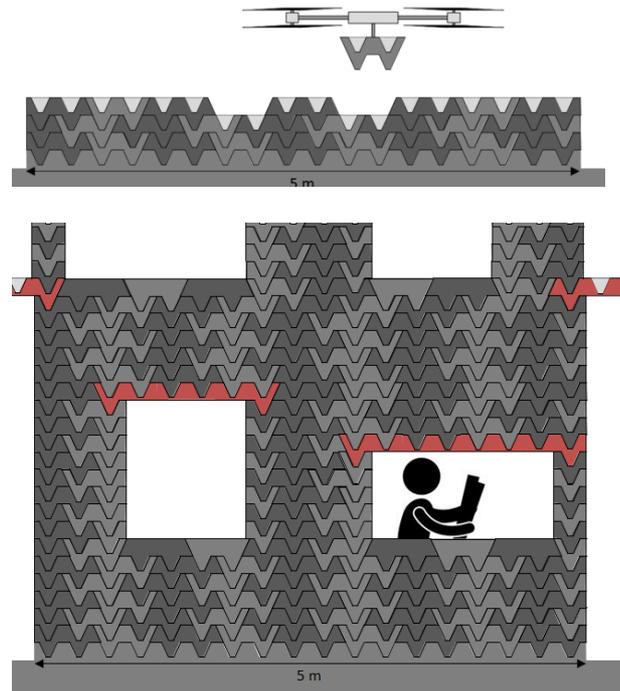


Figure 9. Schéma de la construction d'une façade par un drone.

Cet exemple laisse toutefois penser que la construction par drone permet d'envisager une augmentation importante de la rentabilité des chantiers.

7. Conclusion

Les essais réalisés ont permis de lever 2 incertitudes :

- La suspension et le transport de masses de plusieurs dizaines de kg tout en gardant une très bonne stabilité du drone est possible ;
- La prise et l'empilage de blocs en béton avec une imprécision de quelques cm et avec rapidité, et ceci malgré un pilotage manuel, est possible ;

Ceci permet donc d'aller plus loin et d'investiguer maintenant les voies suivantes :

- Des tests outdoor avec différentes vitesses de vent, ainsi que des tests indoor avec vent artificiel ;
- Le développement d'outils BIM « drone compatibles » ;
- Le développement et/ou l'adaptation de systèmes constructifs adaptés à la construction avec des drones, en particulier la maçonnerie et les ouvrages en bois ;
- Le développement de drones « bâtisseurs », c'est-à-dire adaptés à un chantier (résistants aux intempéries, robustes, moins bruyants, équipés d'outils particuliers) ;
- Le développement de systèmes de guidage précis et les moins onéreux possibles

Bibliographie

- [AUG 14] AUGUGLIARO F. et al., « The Flight Assembled Architecture Installation: Cooperative construction with flying machines », *IEEE Control Systems Magazine*, Volume 34, Issue 4, 2014, pp. 46 – 64.
- [LAT 15] LATTEUR P., GOESSENS S., BRETON J.-S., LEPLAT J., MUELLER C., « Drone-based additive manufacturing of architectural structures », *IASS 2015*, Amsterdam.
- [LIN 11] LINDSEY Q., et al., « Construction of Cubic Structures with Quadrator Team », *Robotics, Science and systems*, 2011, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2012.