

Développement d'un système constructif "drone-compatible" pour la construction de maisons unifamiliales en maçonnerie et en béton

Mémoire présenté par
Jean-François LEBOUTTE , Vincent PARISEL

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

Promoteur
Pierre LATTEUR

Lecteur(s)
Sébastien GOESSENS, Jean-François RONDEAUX

Année académique 2016-2017

Résumé

Aujourd'hui, les drones sont toujours plus utilisés et règlementés. Leur potentiel semble se développer de jour en jour et leur utilisation se tourne de plus en plus vers les secteurs industriels. C'est dans ce contexte que nous voulons nous intéresser à leur potentielle application au milieu de la construction. Pourrions-nous imaginer un monde où les drones seraient eux-mêmes les constructeurs ? Cette utopie nécessiterait de réinventer chaque étape de la construction et de la rendre "drone-compatible". C'est ce que le professeur Pierre Latteur à l'Université catholique de Louvain-la-Neuve est en train de développer au travers de plusieurs thèses de Master. Plus précisément, cette thèse a pour but de développer un modèle constructif "drone-compatible" pour la construction de maisons unifamiliales en béton et en maçonnerie. Les auteurs y détaillent la morphologie des blocs retenus, leurs procédés de fabrication ainsi que les résultats pratiques et théoriques que l'on peut en tirer. L'objectif final est la présentation d'éléments de maçonnerie répondant aux contraintes imposées par la construction "drone-compatible" tout en étant suffisamment développés que pour pouvoir être testés en laboratoire et, plus tard, sur un chantier de construction.

Mots clés : drones, construction, drone-compatible, modèle constructif, Dricks, béton, maçonnerie.

Remerciements

Les auteurs souhaitent adresser leurs remerciements chaleureux aux personnes suivantes :

- Prof. Pierre Latteur, professeur à l'École Polytechnique de Louvain (EPL), pour avoir pris le risque de proposer ce sujet hors du commun ainsi que pour ses feedbacks et sa capacité à nous faire nous poser les bonnes questions.
- M. Sébastien Goessens, assistant à l'École Polytechnique de Louvain-la-Neuve (EPL), pour sa disponibilité, sa connaissance du sujet, son point de vue toujours très perspicace mais aussi ses conseils avisés et son aide en laboratoire. Merci d'avoir mis en place un environnement de travail agréable et propice à la discussion pour mener à bien ce projet.
- M. Michaël Daris, pilote aguerri et fondateur de RC TakeOff, sans lequel il n'aurait pas été possible de réaliser les essais en conditions réelles avec le drone.
- Prof. Benoit Herman pour nos discussions techniques ainsi que la mise à disposition de l'imprimante 3D.
- L'ensemble des membres de l'équipe technique du laboratoire du LEMSC et, en particulier, Stéphane Gorski, Guillaume Gomez et Quentin Mestez pour leur disponibilité, leurs conseils avisés et leur soutien tout au long de l'année. Ils ont été d'une aide précieuse lors de nos nombreuses séances en laboratoire.
- Enfin, nos familles et nos proches, pour les multiples conversations concernant le sujet de ce mémoire mais aussi pour leur aide à la relecture.

Table des matières

Introduction	1
1 Choix d'une typologie de Drick	9
1.1 Caractéristiques essentielles d'un élément drone-compatible	9
1.1.1 Poids réduit	9
1.1.2 Reprise d'imprécisions géométriques	11
1.1.3 Préhension de l'élément	13
1.1.4 Assemblage <i>Lego</i> [®]	13
1.2 Caractéristiques complémentaires	15
1.3 Modèles existants	16
1.3.1 Cônes	16
1.3.2 Blocs à doubles cônes :	18
1.3.3 Droxels et Droxels-T	20
1.3.4 Blocs pyramidaux	22
1.3.5 Blocs Mâle-Femelle	24
1.3.6 Droxels-R	26
1.4 Conclusion	27
2 Développement du type de Drick retenu	31
2.1 Modèle de départ	31
2.2 Améliorations apportées	32
2.2.1 Augmentation de la pente	32
2.2.2 Suppression des arêtes d'épaisseur nulle	33

2.3	Réduction du poids superflu	36
2.4	Améliorations supplémentaires	39
2.5	Modèle final	41
2.5.1	Les Dricks LP	41
2.5.2	Adaptation aux éléments de maçonnerie classique	41
2.6	Récapitulatif	48
3	Système de préhension	51
3.1	Caractéristiques d'un bon système de préhension	51
3.2	Système d'électroaimants	52
3.2.1	Présentation	52
3.2.2	Avantages	52
3.2.3	Inconvénients	53
3.2.4	Récapitulatif	54
3.2.5	Système développé et testé en laboratoire	54
3.3	Système de pince de levage	55
3.3.1	Présentation	55
3.3.2	Avantages	55
3.3.3	Inconvénients	56
3.3.4	Récapitulatif	57
3.4	Système gonflable	57
3.4.1	Présentation	57
3.4.2	Avantages	57
3.4.3	Inconvénients	58
3.4.4	Récapitulatif	58
3.5	Conclusion	59
3.5.1	Meilleur choix	59
3.5.2	Étude de prix de l'inclusion du système d'électroaimants aux blocs	60

4	Réalisation des moules et des blocs	61
4.1	Composition du béton	61
4.1.1	Composants utilisés	61
4.1.2	Compositions de base	64
4.2	Réalisation du moule par impression 3D	64
4.2.1	Méthodologie	64
4.2.2	Problèmes rencontrés	66
4.3	Moulage et démoulage des blocs	69
4.3.1	Préparation du moule	69
4.3.2	Coulage du béton	69
4.3.3	Retournement du moule	70
4.3.4	Démoulage	70
4.4	Essais de compression	71
4.4.1	Dispositif	71
4.4.2	Résultats	72
4.5	Essai d'affaissement au cône d'Abrams	74
4.6	Autres pistes	74
4.6.1	Ytong TM	74
4.6.2	Béton fibré	76
4.6.3	Argex Pompmix S	77
5	Impression 3D	79
5.1	Choix du matériau et de l'imprimante	79
5.1.1	Les matériaux disponibles	79
5.1.2	Les imprimantes disponibles	80
5.1.3	Matériaux utilisés	81
5.1.4	Paramètres utilisés	81

6 Essais réalisés au laboratoire	87
6.1 Essais sur les impressions 3D	87
6.2 Essais sur les Dricks en béton	88
6.3 Essais des Dricks avec le drone	89
6.3.1 Déroulement de l'essai	90
6.3.2 Validations	91
6.3.3 Problèmes rencontrés	92
6.3.4 Conclusions de l'essai du 19 mai 2017	94
6.3.5 Conclusions de l'essai du 17 août 2017	94
Conclusion	97
Bibliographie	104
Liste des figures	105
Liste des tableaux	109
A Annexes	111
A.1 Plans de la Drick LP et de ses variantes	111
A.2 Fiches techniques des matériaux d'impression 3D	122
A.3 Fiche technique de l'Argex Pompmix S	139
A.4 Compositions de béton	143
A.5 Essais de compression	149
A.6 Plans des Cônes	151
A.7 Plans des Blocs coniques	152
A.8 Plans des Droxels	153
A.9 Plans des Blocs pyramidaux	155
A.10 Plans des Blocs Mâle-Femelle	156
A.11 Plans des Droxels-R	157
A.12 Liens vidéos première partie	159
A.13 Liens vidéos seconde partie	160

Nomenclature

Acronymes

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
BIM	Building Information Modelling
CPE	Copolyester
Drick	Contraction des mots "brique" et "drone"
Droxel	Contraction des mots "drone" et "pixel"
EPL	École Polytechnique de Louvain
FDM	Fused-Deposition Modelling
LEMSC	Laboratoire Essais mécaniques, Structures et génie civil
LiPo	Lithium Polymère
LP	Light Plus
LPA	Light Plus Angle
LPB	Light Plus Beam
LPC	Light Plus Column
LPL	Light Plus Lintel
PC	Polycarbonate
PLA	Acide Polylactique
PP	Polypropylène
PSD	Particle Size Distribution
PVA	Polyvinyl Alcohol
STL	STereoLithography
TPU	Thermoplastic Polyurethane
Voxel	Contraction des mots "Volume" et "pixel"

Définitions

Drick	Se dit d'une brique drone-compatible.
Drone-compatible	Se dit d'un élément adapté, conceptuellement et géométriquement, à la construction par drones.
Droxel	Bloc élémentaire adapté à la construction
FDM	Technologie de fabrication additive [1]
Gcode	Format de fichier utilisé pour réaliser des commandes numériques
LiPo (Batterie)	Type de batteries rechargeables utilisant la technologie Lithium-ion et un polymère comme électrolyte.
Maison unifamiliale	Logement occupé par une seule famille. Dans ce mémoire le concept de maison unifamiliale implique des dimensions raisonnables sur un bâtiment de plain pied afin de simplifier les éléments constructifs nécessaires.
STL	Format de fichier utilisé par les logiciels de CAD

Introduction

L'industrie de la construction en 2017 : un constat

Aux États-Unis, des études réalisées par le CII (Construction Industry Institute) montrent qu'entre 25 et 50% des coûts de construction correspondent à du gaspillage et à de l'inefficacité dans l'emploi des ressources humaines et matérielles.[2]

Ces pertes sont issues de mauvaises communications entre les acteurs d'un projet ainsi qu'à la nature aléatoire des processus réalisés. En effet, le manque de standardisation des activités opérées sur chantier entraîne une non-optimisation des mouvements et des processus. Et s'il était possible de pallier ce manque d'optimisation? C'est l'une des solutions apportée par la construction drone-compatible. En effet, le recours à un système automatisé permet d'exécuter des tâches avec une plus grande efficacité, comme divers secteurs de l'industrie ayant recours à de tels systèmes nous le montrent.

En 2017, le FEDRIS (Agence fédérale des risques professionnels en Belgique) [3] a publié ses chiffres relatifs au secteur de la construction. En 2015, 14.266 accidents ont eu lieu sur un chantier de construction, dont 2.021 résultant en une incapacité de travail permanente et 14 décès. Ces chiffres, compilés pour la Belgique, ne sont en rien comparables à ce qui peut se faire ailleurs. En effet, on peut déplorer le manque de considération pour la vie humaine sur certains chantiers à travers le monde. Le développement d'un système constructif automatisé exprime également le souhait de rendre l'industrie de la construction plus sûre et plus respectueuse de son environnement.

De ce constat nous pouvons tirer une conclusion : l'industrie de la construction doit se révolutionner. Cette révolution est en cours actuellement et porte le nom de BIM (Building Information Modelling). Le BIM consiste en l'utilisation d'une source d'information commune et unique pour tous les acteurs d'un projet de construction à travers un modèle tridimensionnel. Il permet ainsi une meilleure coordination des différents intervenants.

Cependant, cette révolution à elle seule n'est pas suffisante. Le BIM ne permet pas de pallier à l'inefficacité de l'emploi des ressources, ni à améliorer la sécurité des chantiers. Il doit donc s'accompagner d'un changement au niveau du système constructif lui même.

Le choix des drones

C'est en observant la nature que Pierre Latteur, professeur à l'École Polytechnique de Louvain, a trouvé l'inspiration qui l'a mené au développement d'un système constructif à l'aide de drones. En effet, des oiseaux construisant leurs nids aux essaims d'abeilles construisant leurs ruches, la nature regorge d'exemples montrant des petits animaux volants effectuant des allers-retours vers leur nid pour, petit à petit, le construire.[4] (Figure 1.)



FIGURE 1 – Hirondelle [5] et abeilles construisant leur nid [6]

De plus, les drones, sorte de robots volants, conviennent bien à une construction automatisée. Ils permettent notamment de se déplacer dans l'espace et d'atteindre virtuellement n'importe quel endroit, de porter des charges de plus en plus lourdes, et sont équipés d'appareils leur permettant de se localiser dans l'espace toujours plus précisément.

La construction à l'aide de robots volants doit cependant s'accompagner d'un nouveau paradigme, d'une nouvelle façon de penser le développement d'un ouvrage. M. Reniers [7] identifie 4 grandes étapes illustrées à la figure 2 :

1. la conception de la structure par les architectes et ingénieurs ;
2. la modélisation de la structure en éléments drone-compatibles ;
3. la traduction de cette modélisation en instructions à communiquer aux drones ;
4. la construction à l'aide des drones.

Le présent travail s'inscrit entre la seconde et troisième étape de ce processus. En effet, pour qu'une structure donnée puisse-t-être modélisée en éléments drone-compatibles, ceux-ci doivent avoir été préalablement développés. Pour ce faire, ces éléments doivent répondre aux contraintes imposées par un tel système constructif.

pour la construction drone-compatible. Il développa en outre un processus de construction pour des structures basiques ainsi qu'un algorithme le contrôlant.[7]

Enfin, Adrien Naveau et Amaury Moncourrier développèrent un premier type de blocs drone-compatible accompagné d'un système de préhension dans leur thèse.[10] Le présent travail s'inscrit dans la continuité de celui de messieurs Naveau et Moncourrier. Tous eurent lieu sous la supervision de Pierre Latteur et Sébastien Goessens.

En 2017, les recherches précédemment entamées ont été poursuivies. Charline Manderlier et Tassilo de Furstenberg ont réalisé une étude de faisabilité du système de construction drone-compatible adapté aux structures en bois, alors que Anne-Sophie Branders et Antoine Bruneau ont été chargés de continuer le développement de l'interface BIM.

Parallèlement à ces travaux de fin d'études, Pierre Latteur et Sébastien Goessens, qui réalise sa thèse de doctorat sur le système drone-compatible, poursuivent leurs recherches. En 2016, ils réussirent notamment à construire une structure composée de colonnes et d'un linteau à l'aide d'un drone [11] comme illustré à la figure 3. Enfin, ils développèrent d'autres modèles de blocs drone-compatibles.



FIGURE 3 – Structure drone-compatible composée de colonnes

Dans d'autres universités :

En 2011, des recherches menées par Raffaello d'Andrea et Matthias Kohler à ETH Zurich [12] firent un premier pas dans le développement d'un système constructif automatisé à l'aide de drones. Ils parvinrent en effet à construire une tour de 6 mètres de haut à l'aide de plus de 1500 briques légères en mousse de polyester et de 4 drones. (Figure 4-a.)

Messieurs d'Andrea et Kohler poursuivirent leurs recherches en 2013 et démontrèrent qu'il est possible de construire des structures composées de câbles à l'aide de drones.[13] (Figure 4-b.)

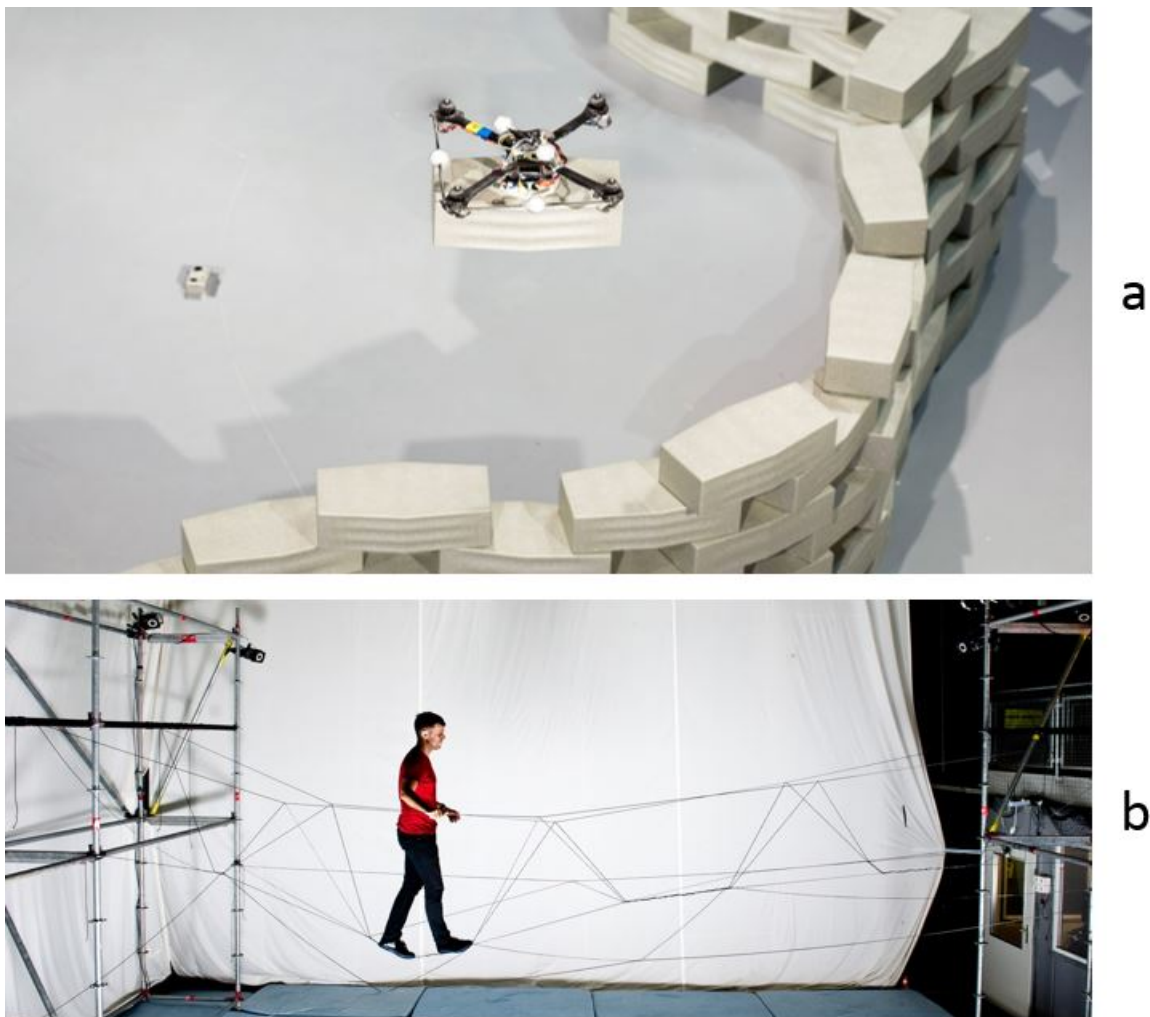


FIGURE 4 – Tour de 6 mètres de haut et pont suspendu réalisés à l'aide de drones à ETH Zurich [12] [13]

Objectifs du travail

Une première définition des objectifs a eu lieu en septembre 2016. Celle-ci pouvait alors se résumer en un objectif simple : la réalisation d'une petite structure par drones, composée d'éléments drone-compatibles, avant juin 2017.

À cet objectif principal, bien que simple de prime abord, est venu s'ajouter une série de sous-objectifs en découlant directement. C'est autour de ceux-ci que le présent travail s'articule, les chapitres les représentant :

1. choix d'une typologie d'éléments drone-compatibles ;
2. développement du modèle retenu ;
3. système de préhension ;
4. fabrication des éléments ;
5. utilisation des techniques d'impression 3D ;
6. tests grandeur nature à l'aide d'un drone ;
7. améliorations et perspectives d'avenir.

Le premier objectif fait état de la nécessité de définir quelles caractéristiques, tant géométriques que pondérales, les éléments drone-compatibles se doivent de respecter. Ces caractéristiques ont été quantifiées sur base d'hypothèses communes aux différents mémoires réalisés cette année. La définition de ces contraintes permet alors d'effectuer une sélection objective parmi les typologies d'éléments drone-compatibles préalablement développées.

Le second objectif représente la continuité du précédent. Une fois le type d'éléments choisi, nous nous sommes attachés à développer et définir géométriquement un bloc qui répond aux contraintes en présence. Cette réflexion a ensuite été portée à l'ensemble des éléments classiques de maçonnerie afin de tous les rendre drone-compatibles et de permettre la construction de maisons unifamiliales.

Le troisième objectif illustre le fait qu'une fois l'élément défini sur le plan géométrique, il est encore nécessaire de développer un système permettant de le prendre, le déplacer et de le poser. En effet, un élément répondant à toutes les contraintes imposées par la construction par drone mais ne disposant pas d'un système de préhension adapté n'aurait pas de sens.

Le quatrième objectif traduit le besoin d'éléments légers mais résistants et la façon dont ceux-ci sont fabriqués. Les éléments doivent être assez légers pour être transportés par drone tout en présentant des résistances suffisantes pour leur rôle constructif, il est donc nécessaire que les matériaux qui les composent soient étudiés. De plus, les aspects plus pratiques liés à la fabrication seront également abordés.

Un regard particulier est ensuite porté à l'impression 3D utilisée pour la fabrication des moules permettant la réalisation de nos modèles. Notre expérience peut ainsi être partagée avec le lecteur afin de présenter rapidement les points clés de l'impression 3D dans le cadre de ce mémoire.

Enfin, une fois les objectifs précédents accomplis, il est possible d'effectuer des essais grandeur nature. De ces essais des conclusions peuvent être tirées sur la viabilité de notre modèle final et certaines pistes de réflexion sur l'avenir sont présentées.

Au fur et à mesure de nos recherches, nous nous sommes rendu compte de la complexité et de la diversité que représente le développement d'un système constructif drone-compatible. Une

multitude de problématiques annexes ont été soulevées lors du développement du système présenté au cours de ce travail. Toutes les aborder n'aurait pas été possible et nombre d'entre elles pourraient représenter des travaux à part entière. Nous nous sommes dès lors imposé un cadre de recherche précis : développer des éléments de maçonnerie permettant la construction de maisons unifamiliales. Une série de réflexions supplémentaires sont cependant présentées dans différentes sections de ce travail afin d'aiguiller le lecteur vers les solutions auxquelles nous avons réfléchi lorsque ces problématiques se sont présentées à nous.

Chapitre 1

Choix d'une typologie de Drick

Résumé

Ce chapitre a pour but de définir les contraintes principales imposées aux éléments drone-compatibles. Une fois définies, elles pourront servir de critères objectifs dans le cadre d'une comparaison et d'une sélection, ou non-sélection, d'un type d'élément.

1.1 Caractéristiques essentielles d'un élément drone-compatible

Avant de commencer à présenter, comparer et développer les différents types d'éléments existant dans la littérature, il nous semble primordial d'insister sur les quatre contraintes intrinsèques à la construction drone-compatible :

- un poids réduit ;
- une reprise des imprécisions liées au positionnement du drone ;
- les éléments doivent être préhensibles par le drone ;
- la possibilité d'assembler les briques en "Legos®".¹

Un modèle satisfaisant à ces quatre contraintes principales et à ces quatre contraintes exclusivement n'est pas suffisant. Une série de considérations complémentaires doivent également être prises en compte afin d'effectuer un choix objectif quant au modèle à développer.

1.1.1 Poids réduit

La principale contrainte imposée aux blocs est le poids. En effet, dans l'état actuel du développement des drones, la charge utile est le facteur limitant à leur utilisation en tant qu'outil de construction. Celle-ci varie selon les modèles de drone considérés. Elle varie notamment en fonction des dimensions et du nombre d'hélices ainsi que de la puissance des batteries utilisées.

1. Cette caractéristique est particulière aux éléments de maçonnerie

Dans le cadre de la construction de maisons unifamiliales à l'aide de drones, notre objectif est de travailler avec un essaim de drones dans lequel chacun pourrait communiquer avec les autres et travailler de concert. Des dimensions réduites sont donc intéressantes pour permettre à un maximum de drones de travailler ensemble sans encombrer l'espace. Un équilibre doit cependant être trouvé entre charge utile et dimensions du drone. L'équipe de recherche de l'Université catholique de Louvain, en collaboration avec RC TakeOff², ont pensé et construit un drone respectant cet équilibre (figure 1.1). Le drone ainsi construit est d'une envergure d'1m80, pour une charge utile de 30kg. Il est en effet équipé de 8 moteurs d'une puissance de 8 kW et est alimenté par deux batteries LiPo de 22V.[11]

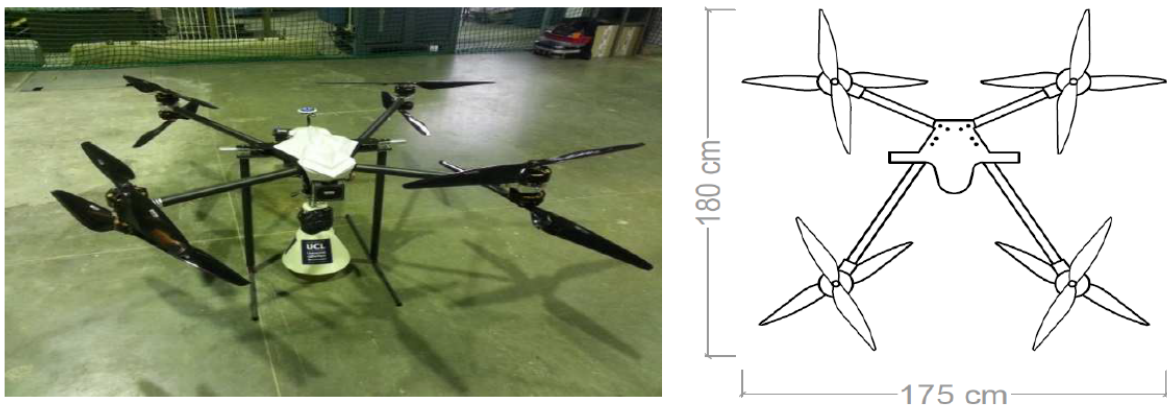


FIGURE 1.1 – Drone développé à l'Université catholique de Louvain [4]

Les dimensions des drones utilisés en constructions sont bien évidemment amenées à diminuer au regard des améliorations techniques dans le domaine, mais le contexte dans lequel ce travail s'inscrit est celui d'un monde où les contraintes de poids sont celles imposées par ce drone en particulier.

Gardons en tête qu'il est cependant toujours possible de recourir à l'utilisation sporadique de drones de plus grandes dimensions, ou peut être même de petits hélicoptères automatisés, pour certains éléments particulièrement lourds lors des phases critiques de chantier. Cette possibilité est évidemment à limiter au maximum afin de garantir un fonctionnement optimal de l'essaim de drones. Le but de la construction par drone étant de tout automatiser dès le démarrage du chantier, l'insertion d'un drone de plus grande taille ne devrait, idéalement, en rien déranger le bon fonctionnement de l'essaim.

Pour garantir un poids réduit, deux solutions nous semblent évidentes : utiliser un matériau léger ou utiliser moins de matière. Dans le premier cas, des études sur des bétons légers ont été réalisées par A. Naveau et A. Moncourrier [10] et ont pu être complétées lors de différents essais de composition de béton qui sont détaillés dans le chapitre 4. Dans le second cas, des solutions de formes creuses ont pu être développées et seront elles aussi présentées dans le chapitre 2.

2. <http://www.rctakeoff.be/>

1.1.2 Reprise d'imprécisions géométriques

La seconde contrainte, tout aussi importante, est la prise en compte de l'imprécision spatiale du drone. Nous entendons par là l'erreur de positionnement de celui-ci par rapport à sa position souhaitée. Cette erreur varie en fonction du système de positionnement utilisé par le drone. Elle doit être diminuée au maximum avec comme objectif sa suppression. Des études ont déjà été réalisées et présentent les différents systèmes existants tandis que d'autres sont toujours en cours à ce sujet. Nous invitons le lecteur désireux d'avoir des informations complémentaires à propos des systèmes de positionnement à consulter le travail réalisé par A. Paques et N. Nerhi. [14]

Les erreurs de positionnement varient de quelques centimètres à quelques mètres en fonction du système de guidage du drone. Les principaux systèmes existants ainsi qu'un ordre de grandeur de la précision que l'on peut atteindre avec ceux-ci sont repris dans le tableau 1.1.

Système de guidage	Précision
GPS	10-15 mètres
D-GPS	10-20 centimètres
GPS-RTK	2.5 centimètres
Lasers fixes	5 centimètres
Localisations par de multiples caméras	2 centimètres
Station totale	1 centimètre

Tableau 1.1 – Caractéristiques des différents systèmes de guidage

Dans notre thèse, nous avons imposé comme hypothèse forte l'utilisation d'un drone capable de se situer dans l'espace avec une précision de 5 centimètres, et ce dans chaque direction. Ces 5 centimètres sont issus de l'expérience acquise par l'équipe de recherche qui a déterminé que, lors d'un pilotage manuel, le pilote pouvait positionner le drone dans l'espace avec une précision de l'ordre de 5 centimètres. Une diminution de cette imprécision pourra être envisagée à l'avenir lorsque l'utilisation de systèmes automatisés sera possible. Cela ne pourra être que bénéfique étant donné la corrélation qui existe entre la reprise d'imprécisions et simplicité du modèle.

Dans le cadre de notre application, la problématique des erreurs de positionnement a toute son importance. En effet, la moindre erreur de placement peut s'additionner à une autre à chaque nouvelle couche de bloc, entraînant ainsi à chaque étage une erreur cumulée d'autant plus grande. Nous nous retrouvons donc vite dans des situations où les blocs ne sont plus capables de se superposer tant l'erreur est importante par rapport aux dimensions du bloc.

Pour solutionner le problème des imprécisions, il faut imaginer des géométries de blocs qui permettent un empilement qui reprend ces imprécisions en faisant glisser le bloc supérieur jusqu'à sa position finale souhaitée, et ce pour toutes les positions de départ décalées de maximum 5 centimètres dans chaque direction. Pour ce faire, il faut prévoir des surfaces de reprise qui guident le bloc à sa place. Un exemple est illustré sur la figure 1.2. En (a) le bloc arrive avec une imprécision par rapport à la position voulue. Les pentes des blocs inférieurs permettent alors de guider le bloc supérieur jusqu'à la position souhaitée (b).

Il est donc important de comprendre le fonctionnement de telles surfaces de reprise d'imprécisions pour arriver à comprendre correctement la logique derrière les blocs existants.

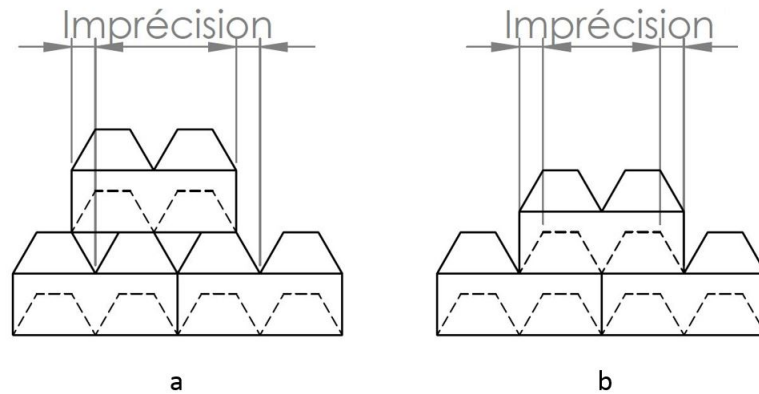


FIGURE 1.2 – Reprise des imprécisions

Les surfaces de reprise sont de deux types :

1. les surfaces de type "descendantes" ;
2. les surfaces de type "adjacentes".

Le premier type de surfaces de reprise permet à un bloc d'une rangée supérieure de venir se positionner correctement sur les blocs de la rangée inférieure (en rouge sur la figure 1.3 a et c). Celles-ci doivent être suffisamment pentues que pour permettre un bon glissement et éviter un blocage du bloc lors de sa pose comme illustré sur la figure 1.3-b.

Le second type de surfaces de reprise concerne la pose d'un bloc à côté d'un bloc déjà présent (en vert sur la figure 1.3-c). Dans ce cas, la surface de reprise doit empêcher que le nouveau bloc reste coincé sur le bloc adjacent comme illustré sur la figure 1.3-d.

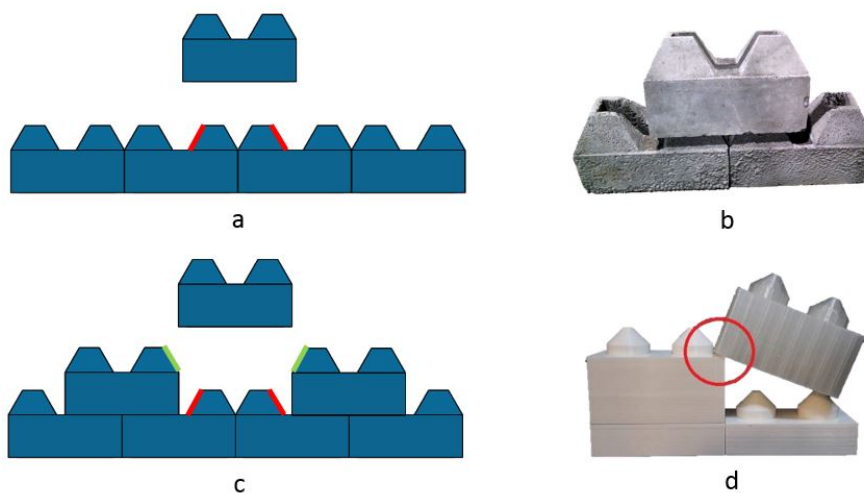


FIGURE 1.3 – Surfaces de reprise des imprécisions

Ces surfaces de reprise amènent à des géométries particulières qui doivent être pensées simultanément dans plusieurs directions. Cela peut être fait, par exemple, via l'utilisation de formes coniques ou pyramidales.

1.1.3 Préhension de l'élément

Un élément ne peut être drone-compatible s'il ne peut pas être soulevé par le drone depuis la zone de stockage et déposé sur le site en construction. Le système de préhension doit donc être pensé et directement intégré dans les modèles. Il existe une multitude de systèmes différents, dont certains sont abordés en détail dans la thèse de A. Naveau et A. Moncourrier. [10]

Nous nous limiterons à la description des systèmes les plus adaptés aux éléments développés au cours de ce travail : les systèmes électromagnétiques et les systèmes de pinces. Chacun de ceux-ci peut être avantageux dans certaines situations. Nous les présentons et détaillons dans le chapitre 3.

1.1.4 Assemblage *Lego*[®]

Les éléments de maçonnerie peuvent être agencés de deux manières. La première consiste à placer les blocs les uns sur les autres de façon à former des colonnes qui peuvent éventuellement se placer les unes à côté des autres pour former des parois. (Figure 1.4.)

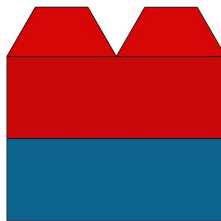


FIGURE 1.4 – Assemblage en colonne

L'inconvénient majeur d'un tel agencement réside dans le fait que les colonnes ainsi formées sont indépendantes et ne sont rendues solidaires que par un éventuel matériau de liaison.

La seconde manière de placer les blocs est de les agencer tels des Legos[®] (figure 1.5). Les blocs ne se superposent pas directement et permettent de lier deux blocs adjacents entre eux. Cet agencement est primordial pour garantir une stabilité suffisante si l'on veut mettre en place des parois.

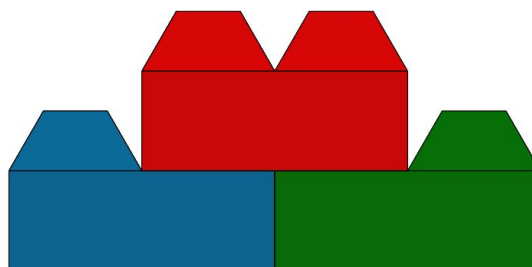


FIGURE 1.5 – Assemblage en Legos[®]

Étant donné que la construction par drone ne nous permet pas d'utiliser un matériau de liaison aisément, nous pouvons dès lors conclure qu'il est nécessaire d'utiliser le type d'assemblage en Legos[®].

Ordre de pose des blocs :

Il existe deux types de pose possibles. Leur différence réside dans la vitesse à laquelle on couvre une surface au sol, ou à laquelle on monte en hauteur. La première, que nous appelons pose en pyramide, se fait de manière continue. Chaque bloc est placé à côté d'un bloc adjacent qui le guide pour le mettre en place. Cette première possibilité permet la construction de paroi par couche et lorsque suffisamment de blocs sont posés sur une même couche (deux suffisent) une deuxième couche peut être commencée. La pose peut donc facilement se faire sur plusieurs rangées à la fois d'où son nom de pose en pyramide.

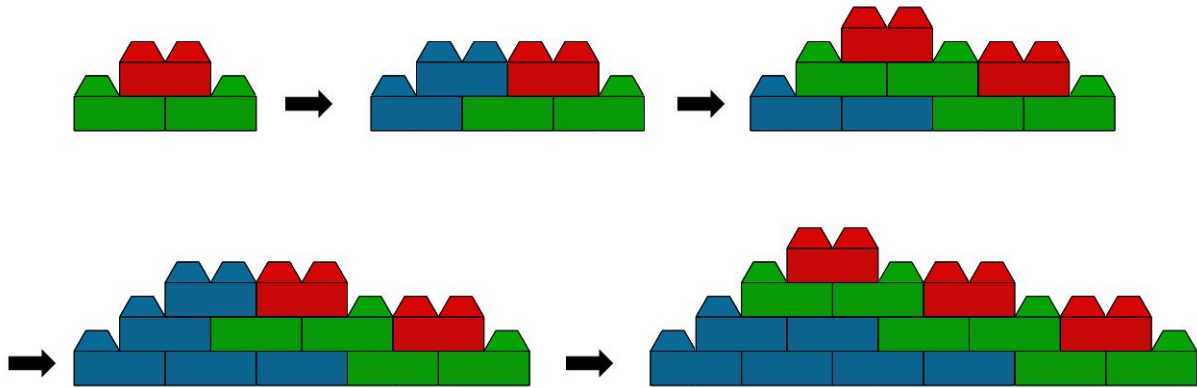


FIGURE 1.6 – Système de pose en pyramide

Sur la figure 1.6, on peut voir en rouge les blocs posés à chaque nouvelle étape. On voit bien que dès que 2 blocs sont positionnés correctement sur la rangée inférieure (en vert), on peut placer les blocs de la rangée supérieure. Ce moyen de pose permet donc de prendre rapidement de la hauteur et de permettre la pose de blocs sur de multiples rangées simultanément.

La deuxième méthode est spécifique à certains types de blocs. Comme on peut le voir sur la figure 1.7, cette méthode consiste à venir placer un bloc sur deux pour ensuite venir placer entre ceux-ci le bloc manquant. Celui-ci se sert alors des deux premiers blocs pour se placer dans la bonne position. Cette seconde technique permet plus difficilement de travailler sur plusieurs rangées simultanément même si cela reste possible.

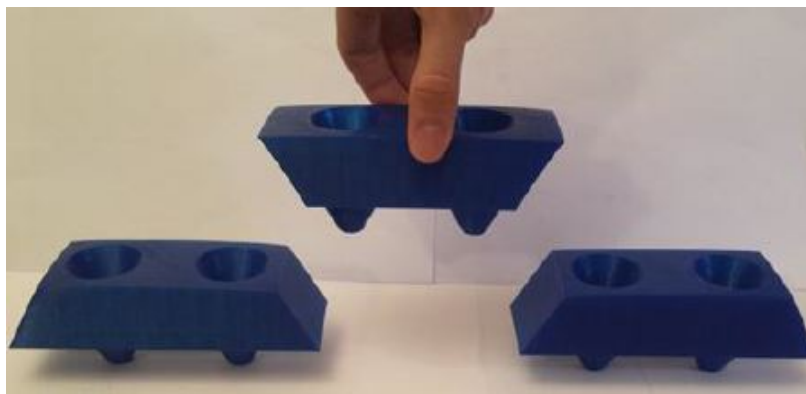


FIGURE 1.7 – Système de pose mâle-femelle

1.2 Caractéristiques complémentaires

Outre les quatre contraintes majeures imposées pour assurer la drone-compatibilité et présentées dans la section 1.1, il faut aussi prendre en compte une série d'éléments qui facilitent la fabrication, l'utilisation et la mise en oeuvre des éléments. Ces critères ne sont pas tous aussi importants les uns que les autres, mais il est souhaitable, dans la mesure du possible, d'en respecter un maximum afin de viser un idéal.

La première caractéristique sur laquelle nous souhaitons insister a été rencontrée à de multiples reprises lors de nos essais en laboratoire. La présence d'arêtes d'épaisseur nulle fragilise celles-ci qui, lors du moulage, ne sont pas correctement remplies. En plus de la difficulté de moulage, nous obtenons un fini non seulement de moindre qualité, mais également très cassant. Les arêtes se brisent donc fréquemment et la géométrie réelle diffère de la géométrie voulue ce qui impacte directement le glissement des blocs. La figure 1.8 illustre ce problème.



FIGURE 1.8 – Illustration du problème des arêtes d'épaisseur nulle

Dès lors, nous avons essayé d'éviter les modèles de bloc présentant des arêtes d'épaisseur nulle ou, si cela s'avérait possible, trouver des solutions à ce problème. Les possibilités de solutions qui ont été développées sont présentées dans la section 2.2.2.

À ce critère expérimental s'ajoutent des critères définis par P. Latteur, S. Goessens et C. Mueller [15], eux-mêmes complétés par l'expérience acquise lors de différents brainstormings. Une liste reprenant ces différents critères est reprise ci-dessous :

- la facilité avec laquelle un élément peut glisser sur un élément déjà en place ;
- la facilité de pose d'un élément entre deux éléments existants ;
- la forme générale et son impact sur la manoeuvrabilité, la vitesse de pose et donc l'intérêt économique que l'élément représente ;
- les dimensions ou, du moins, les ratios entre les poids, dimension et résistance d'un élément ;
- la résistance de l'élément ;
- les possibilités architecturales qu'offre un élément sans nécessiter d'adaptation.

Certains de ces critères peuvent être modifiés en changeant la géométrie des éléments, d'autres varient en fonction du matériau utilisé.

Forts de la connaissance de ces différents critères, nous allons maintenant pouvoir comparer les éléments présents dans la littérature et définir leurs points forts et points faibles. Nous en ressortirons alors le modèle répondant le plus favorablement au plus grand nombre de critères.

1.3 Modèles existants

Il existe, dans l'état actuel de la recherche et dans la continuité des mémoires précédents, plusieurs propositions de formes d'éléments de maçonnerie drone-compatibles. P. Latteur, S. Goessens et C. Mueller [15] font un état de l'art des différents types de Dricks. Ci-après, nous présentons et offrons notre perspective sur les principaux modèles afin de décider de la meilleure forme à retenir et à développer. L'analyse des différents blocs se fera selon les critères énoncés précédemment. Remarquons que les dimensions des blocs présentés peuvent varier. En effet, tous ces blocs n'ont pas été développés avec pour objectif de reprendre 5 centimètres d'imprécision. Cependant, leurs dimensions peuvent être adaptées pour satisfaire à ce critère. Les plans de ces blocs, aux dimensions telles qu'elles ont été pensées par leurs créateurs, sont disponibles dans l'Annexe [REF]

1.3.1 Cônes

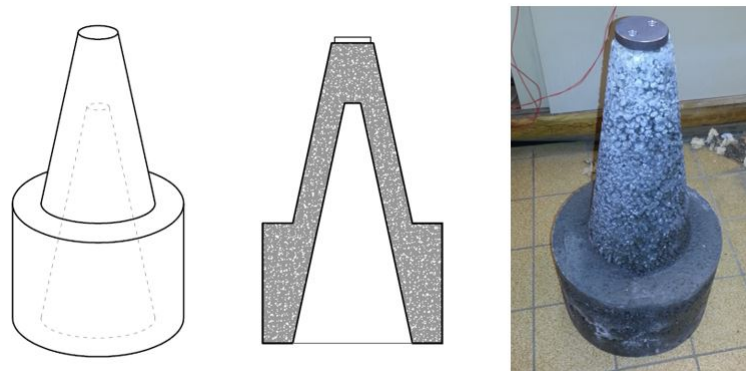


FIGURE 1.9 – Cônes

Description :

Les cônes ont été développés par S. Goessens. Ceux-ci ont une base cylindrique surmontée d'un cône. Le dessous de la pièce est évidé en forme conique pour permettre un emboîtement de plusieurs éléments.

Avantages :

L'utilité principale des cônes est la construction de colonnes grecques. [11] Elles présentent un bon fini de surface et aucun interstice entre les éléments. (Figure 1.10 a.)

Le principal avantage du cône est sa forme qui permet une reprise des imprécisions dans toutes les directions simultanément à l'aide d'une quantité de matière réduite par rapport aux autres blocs.

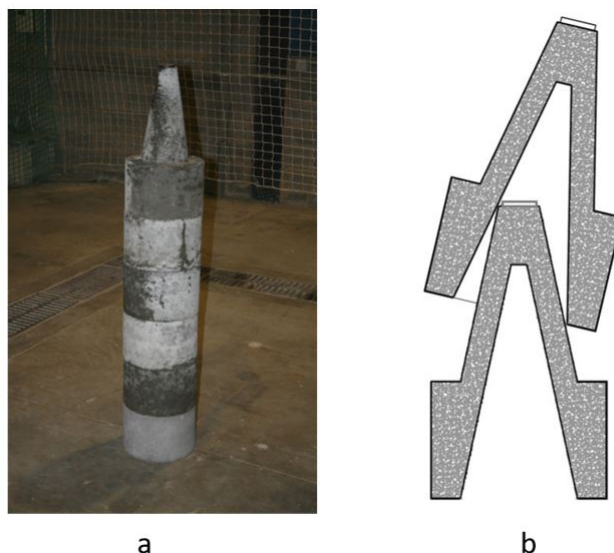


FIGURE 1.10 – a. Réalisation d'une colonne par empilement de cônes. b. Blocage possible des cônes.

D'autre part, la pente du cône est libre d'être plus ou moins importante, ce qui amène à différents niveaux de glissement possible entre les éléments, la pente la plus élevée possible étant à privilégier.

Enfin, l'absence d'arêtes le long de la partie conique assure un très bon glissement des éléments entre eux.

Inconvénients :

L'avantage qu'est le bon empilement des cônes en colonne est aussi un inconvénient. En effet, ces éléments ne présentent pas d'autres possibilités architecturales.

Par ailleurs, il est arrivé lors des essais que les éléments coniques se bloquent. Lorsque le drone se positionne mal lors de la descente vers un cône inférieur, l'élément porté par le drone peut se bloquer de biais sur l'élément sur lequel il était censé se poser. (Figure 1.10 b.) Ce phénomène est d'autant plus courant lorsque la pente choisie pour les cônes est élevée. Un équilibre est donc à trouver lors du choix de la pente des cônes pour permettre un bon glissement sans causer de blocage.

Récapitulatif :

Avantages	Inconvénients
Construction en colonne Bon glissement dans toutes les directions Peu de masse superflue	Construction limitée verticalement Blocage possible pour de grandes pentes

Tableau 1.2 – Avantages et inconvénients des cônes

1.3.2 Blocs à doubles cônes :

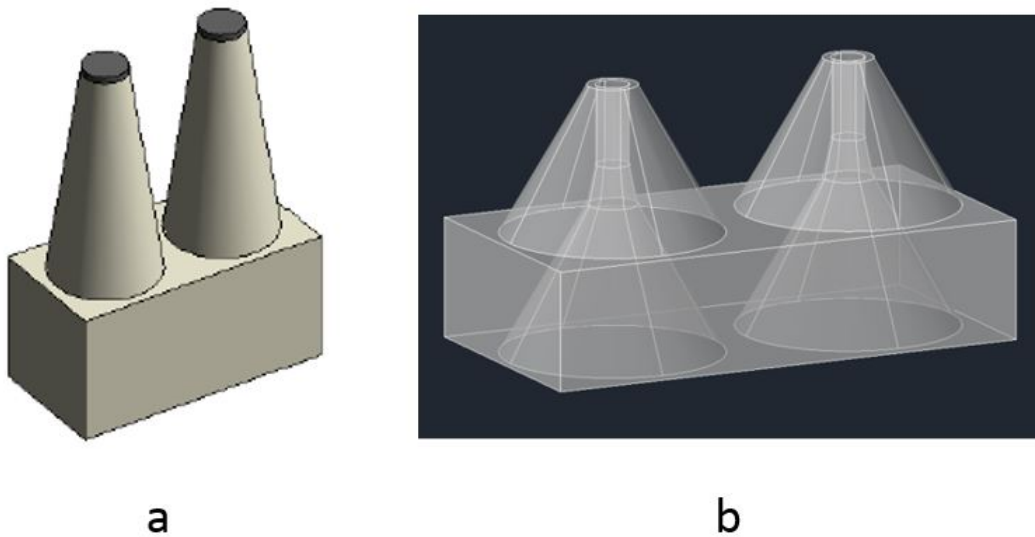


FIGURE 1.11 – Bloc à doubles cônes

Description :

Les blocs à doubles cônes (figure 1.11 a & b) sont l'adaptation directe des cônes afin de rendre leur assemblage en Legos[®] possible.[10] Pour ce faire, deux cônes ont été utilisés au lieu d'un seul. Leur base est toujours évidée pour permettre l'emboîtement et l'absence d'arêtes le long des surfaces coniques permet la libre rotation entre les différents éléments coniques. Une variante est proposée (figure 1.11 b). Celle-ci est creusée en son centre pour permettre le passage de barres de guidage.

Avantages :

En plus du bon assemblage en colonnes, les éléments coniques peuvent s'empiler selon les assemblages en Legos[®]. Comme pour les cônes, le glissement est aisé dans toutes les directions grâce aux cônes et à l'absence d'arêtes. L'ouverture du cône peut être choisie afin de l'améliorer davantage en permettant un meilleur glissement.

D'autre part, les possibilités architecturales sont variées car l'absence d'arêtes permet aux éléments de s'agencer entre eux selon n'importe quel angle. Pour ce faire, une découpe des blocs est cependant nécessaire.

Enfin, notons que les blocs à doubles cônes présentent l'avantage de pouvoir être adaptés en éléments longs en voyant une de leurs dimensions augmenter sans entraîner l'augmentation des autres, contrairement à certains des blocs présentés ci-après.

Inconvénients :

La liberté d'angle entre les blocs est un avantage, mais aussi un inconvénient. En effet, aucune barrière physique ne permet d'empêcher la rotation d'un élément autour d'un cône et de fixer l'angle de cet élément à poser. L'utilisation de barres de guidage (figure 1.12) est donc encouragée afin de garantir le bon agencement des blocs.[10] Un tel dispositif de barres de guidage peut rendre incompatible l'utilisation de drones de par la place qu'elles prennent au-dessus des blocs et la nécessité de faire chuter les blocs en place.

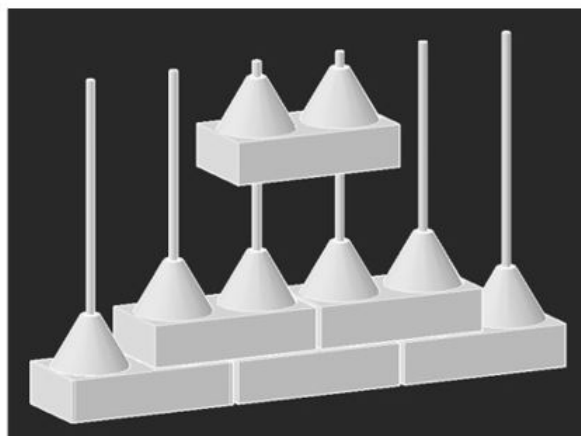
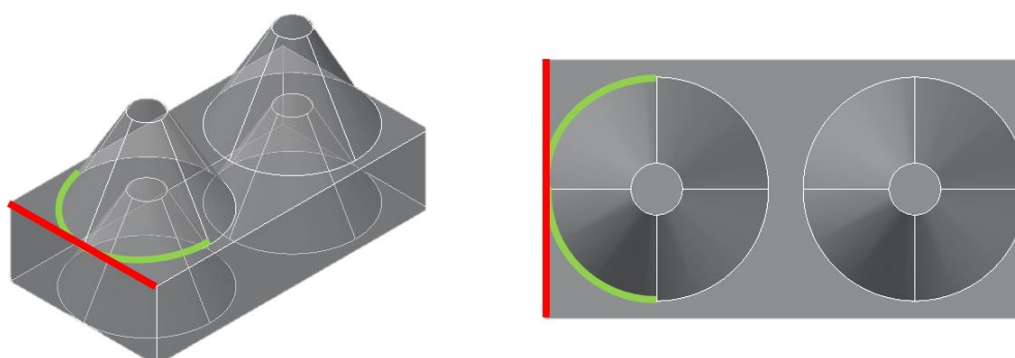


FIGURE 1.12 – Blocs coniques avec barres de guidage

Le deuxième inconvénient de ces blocs est que la surface effective de reprise des imprécisions adjacentes est très faible. On peut en effet voir sur la figure 1.13 en vert le pourtour de la surface de reprise des imprécisions adjacente du cône, comme expliqué dans la section 1.1.2, et en rouge l'arête en contact avec le bloc adjacent. Celles-ci ne se rencontrent qu'en un point ce qui réduit considérablement la surface de reprise adjacente du cône et donc son efficacité. Cela peut amener à l'impossibilité de placement des blocs adjacents.



Délimitation de la surface de reprise adjacente
Arête en contact avec le bloc adjacent

FIGURE 1.13 – Problème lié à la surface de reprise de type adjacente des blocs en doubles cônes

Le dernier inconvénient est la présence d'arêtes d'épaisseur nulle. Comme on peut le voir sur la figure 1.14, si l'on veut passer d'un modèle sans surfaces de reprise adjacente (a) à un modèle avec surfaces de reprise adjacentes (b) on obtient des arêtes d'épaisseur nulle avec les inconvénients qui les accompagnent.

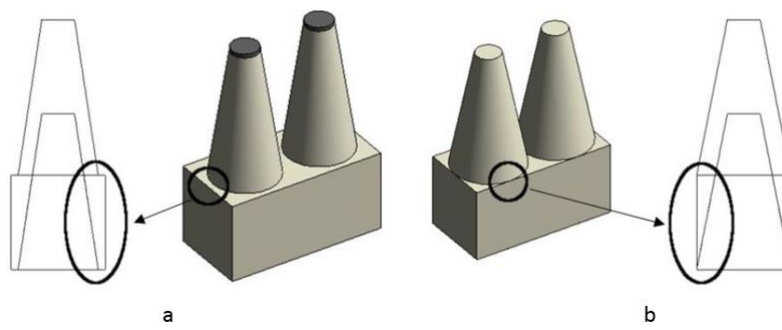


FIGURE 1.14 – Problème d'arêtes d'épaisseur nulle dans le cas des blocs coniques

Récapitulatif :

Avantages	Inconvénients
Construction en colonne et en Legos® Bon glissement dans toutes les directions Peu de masse superflue Possibilités architecturales variées	Assemblages moins stables Blocage possible pour de grandes pentes Placement des blocs adjacents Arêtes d'épaisseur nulle

Tableau 1.3 – Avantages et inconvénients des blocs à doubles cônes

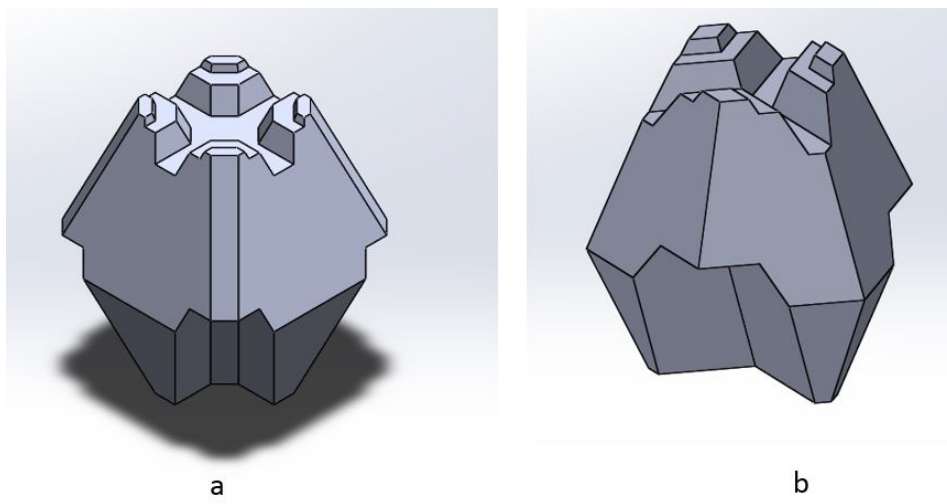
1.3.3 Droxels et Droxels-T

FIGURE 1.15 – Droxel (a) et Droxel-T (b)

Description :

Droxel est une contraction entre drone et voxel, voxel désignant un pixel volumétrique. C'est donc une sorte de pixel tridimensionnel. Un Droxel est une unité élémentaire de maçonnerie qui peut être placée par drone[8]. Leur forme particulière s'éloigne de la maçonnerie classique afin de permettre une infinité de possibilités architecturales. Le Droxel-T [15] est une variante à 3 extrémités du Droxel "classique" qui en possède 4.

Avantages :

Le principal avantage des Droxels est qu'ils permettent une très grande variété de possibilités architecturales. Ils offrent notamment la possibilité de réaliser des porte-à-faux. Chaque Droxel à 5 autres placements de Droxels possibles ce qui le rend très polyvalent.

De plus, des structures temporaires peuvent être mises en place pour permettre de contrebalancer les porte-à-faux et atteindre des portées plus importantes sans la nécessité d'un support. On s'affranchit ainsi des contraintes imposées par les phases d'étalement. Quelques exemples des possibilités qu'ils offrent sont illustrés sur la figure 1.16.

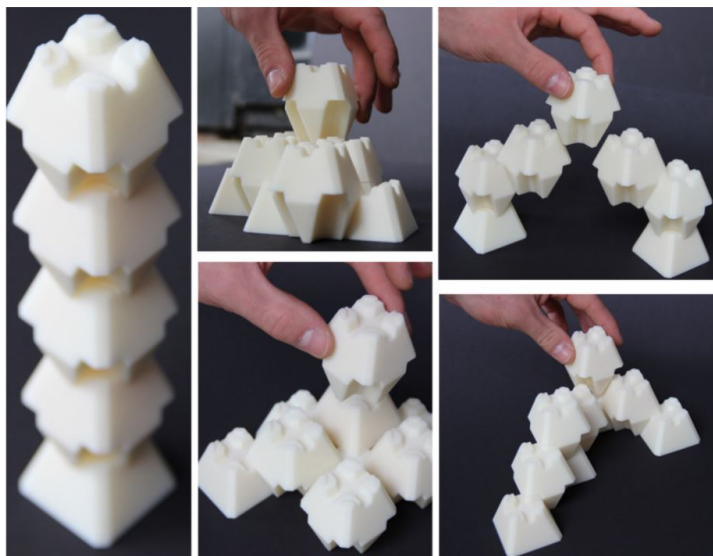


FIGURE 1.16 – Exemples des multiples designs possibles à l'aide de Droxels

Inconvénients :

Les Droxels ont cependant 3 défauts :

1. leur forme
2. les interstices qui apparaissent entre les éléments
3. leur poids

Le premier désavantage majeur des Droxels est le rapport entre ses dimensions globales et les dimensions de ses surfaces permettant de reprendre des imprécisions de positionnement du drone. En effet, pour pouvoir reprendre 5 centimètres d'imprécision, il est nécessaire d'augmenter la taille du Droxel jusqu'à obtenir un élément dont la taille et le poids le disqualifient en tant qu'élément drone-compatible. De plus, ses surfaces de reprise d'imprécision présentent des pentes douces, ce qui limite le glissement des éléments les uns sur les autres.

Le deuxième désavantage majeur des Droxels est la présence d'interstices entre les éléments, ce qui rend les parois non étanches et demande un travail supplémentaire pour être acceptable. Enfin, le centre des Droxels étant plein, ils s'accompagnent d'une masse inutile non négligeable.

Notons également que les Droxels ne sont pas capables, en une seule rangée de blocs, de construire des murs à angle droit. Ils nécessitent plusieurs rangées de blocs ce qui augmente leur temps de pose. Il convient également de noter que leur forme alambiquée les rend complexes à mouler.

Récapitulatif :

Avantages	Inconvénients
Porte-à-faux sans supports Polyvalence de formes	Reprise d'imprécisions limitée Fabrication complexe Fragilité des éléments de porte-à-faux Poids inutile Temps de pose

Tableau 1.4 – Avantages et inconvénients des Droxels

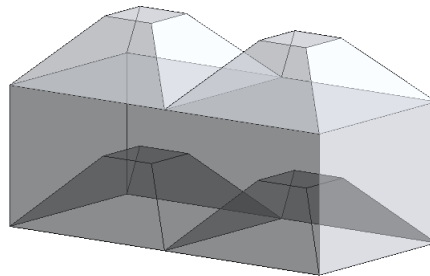
1.3.4 Blocs pyramidaux

FIGURE 1.17 – Bloc pyramidaux

Description :

Les blocs pyramidaux ont été développés en détail par A. Naveau et A. Moncourrier en 2016. [10] Ceux-ci ressemblent aux blocs coniques mais disposent de pyramides en lieu des cônes. Des surfaces de reprise sont donc présentes dans chaque direction et disposent d'arêtes qui permettent un emboîtement des blocs dans la bonne position.

Avantages :

Cette disposition permet des assemblages de type Legos[®] et est assez intuitive. La pente peut être augmentée pour faciliter le glissement et une pente de 60° est recommandée. Ce bloc est dans l'ensemble un bon compromis entre simplicité et efficacité.

La présence d'arêtes sur ces blocs permet une bonne stabilité des assemblages en garantissant le positionnement des blocs supérieurs. La géométrie de ces blocs est assez simple et permet donc un moulage aisé.

Leurs dimensions sont assez proches des blocs standards de maçonnerie et en font des blocs faciles d'utilisation et de compréhension.

Inconvénients :

Ces blocs présentent néanmoins quatre inconvénients :

1. les essais en laboratoire, présentés dans le chapitre 6, ont montré que le glissement des blocs pyramidaux n'est pas toujours garanti et que les blocs restent parfois coincés les uns sur les autres quand les pentes sont trop faibles. L'emboîtement de ce type de blocs n'est donc pas toujours garanti ;
2. la géométrie simple de ces blocs n'empêche pas le problème des arêtes d'épaisseur nulle ;
3. ils possèdent une quantité élevée de matière inutile amenant à un poids supplémentaire non négligeable ;
4. les possibilités architecturales de ces blocs sont limitées à des murs droits ou des murs à 90° à cause de l'utilisation des pyramides. (Figure 1.18.)

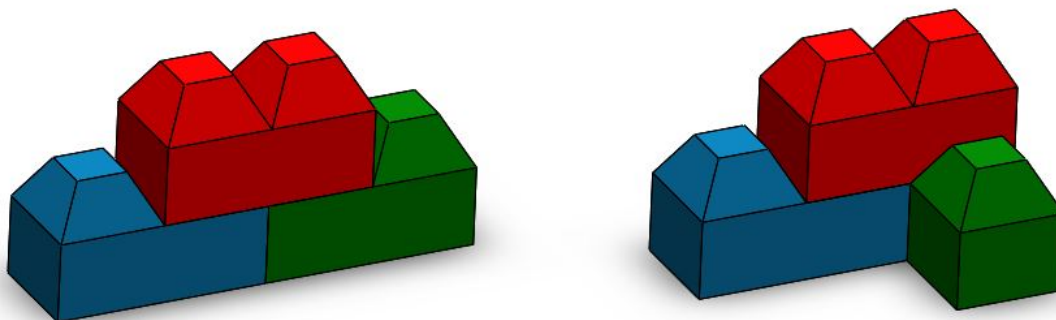


FIGURE 1.18 – Positionnements possibles des blocs pyramidaux

Récapitulatif :

Avantages	Inconvénients
Assemblages Legos® Facilité de production Simple d'utilisation et de compréhension	Problème de glissement en laboratoire Arêtes d'épaisseur nulle Poids inutile Possibilités architecturales limitées

Tableau 1.5 – Avantages et inconvénients des blocs pyramidaux

1.3.5 Blocs Mâle-Femelle

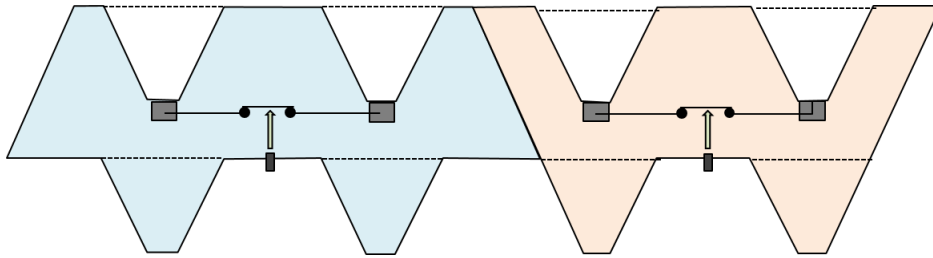


FIGURE 1.19 – Bloc mâle-femelle

Description :

Le principe des blocs mâle-femelle [10] repose sur le fait que la partie latérale du bloc possède une pente ou une forme géométrique inverse selon qu'il s'agisse du type mâle ou femelle. La construction ne se fait donc plus avec un seul type de bloc mais deux.

Avantages :

Les pentes aux extrémités de ces blocs, qui servent de surface de reprise adjacente, peuvent être plus fortes. Cela implique un meilleur glissement et une bonne reprise des imprécisions. En effet, pour une même imprécision horizontale à reprendre, un bloc ayant une plus grande hauteur pourra avoir une plus grande pente. Or, ces blocs ont leurs pentes situées sur toute leur hauteur et non plus sur un cône ou une pyramide uniquement. Ils permettent donc d'obtenir un meilleur glissement des blocs les uns sur les autres.

Inconvénients :

Le premier inconvénient de ce type de bloc est que la hauteur entière de chaque bloc sert au guidage du bloc adjacent, là où le système de guidage de blocs de type pyramidaux par exemple se limite à une partie de sa hauteur. Cela entraîne donc un poids supplémentaire par rapport à d'autres géométries de blocs.

Ensuite, les pentes de la partie femelle de ce type de blocs sont redondantes avec celles de la partie mâle car les imprécisions qu'elles permettent de reprendre sont déjà reprises par les pentes latérales aux extrémités du bloc ainsi que par les sommets de la partie mâle. Sur la figure 1.20 on peut voir en rouge et en vert les surfaces de reprise des imprécisions qui sont redondantes et qui amènent donc un poids inutile. Cette géométrie particulière ne permet pas, par ailleurs, d'éliminer le problème des épaisseurs nulles.

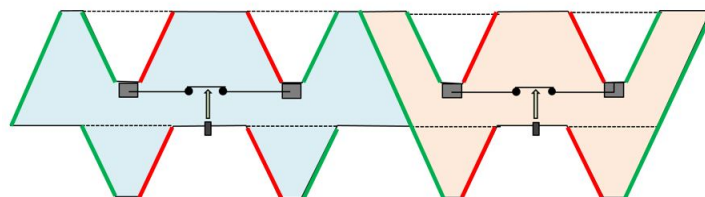


FIGURE 1.20 – Redondance des surfaces de reprise des imprécisions

De plus, nous sommes ici en présence d'un exemple de blocs dont l'ordre de pose doit se faire de façon particulière. Les blocs mâle-femelle nécessitent en effet toujours la pose de deux blocs mâles avant de pouvoir poser un bloc femelle (figure 1.21). Le système de pose lié aux blocs mâle-femelle est donc plus limitant que le système de pose des autres blocs comme expliqué dans la section 1.1.4.

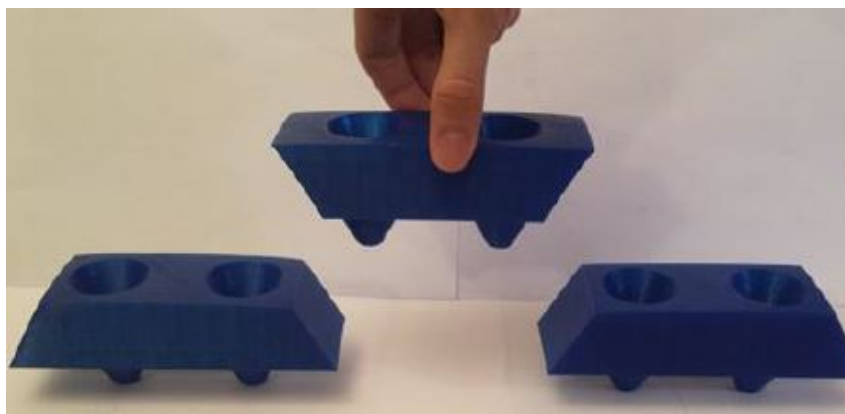


FIGURE 1.21 – Agencement des blocs mâle-femelle

Notons enfin que le fait de doubler le nombre de blocs types nécessaires à la construction implique que chaque élément supplémentaire de maçonnerie (coins, linteaux, etc.) doit être dédoublé pour assurer un emboîtement possible en fonction du type de blocs adjacents. Les blocs de coins deviennent par ailleurs très complexes géométriquement comme illustré sur la figure 1.22.

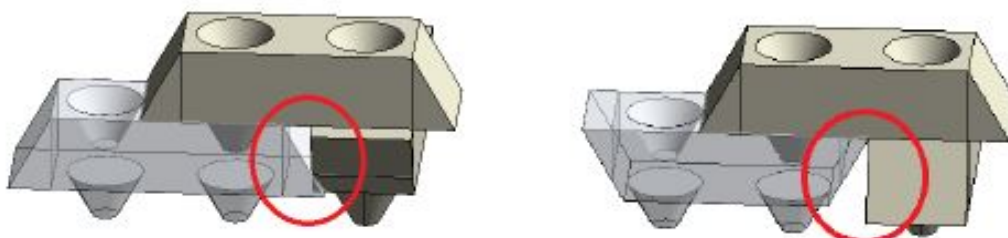


FIGURE 1.22 – Géométrie complexe des coins liée aux blocs mâle-femelle

Récapitulatif :

Avantages	Inconvénients
Imprécisions reprises plus grandes Meilleur emboîtement dû à la pente plus élevée	Poids élevé Redondance des surfaces de reprise Arêtes d'épaisseur nulle Temps de pose plus élevé Complexité et nombre de types de blocs

Tableau 1.6 – Avantages et inconvénients des blocs mâle-femelle

1.3.6 Droxels-R

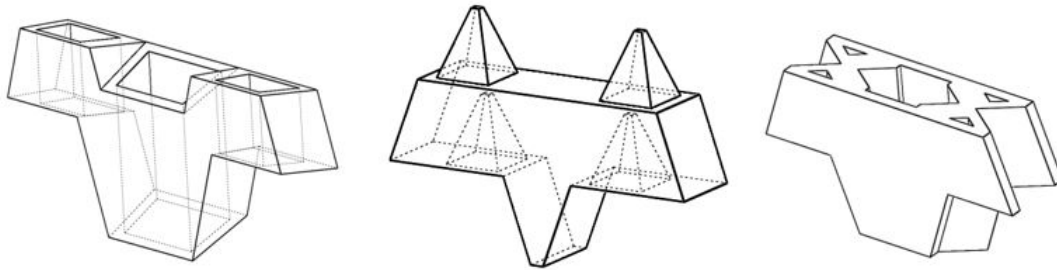


FIGURE 1.23 – Exemples de Droxels-R

Description :

Les Droxels-R sont des variantes plus complexes des blocs pyramidaux [15]. L'idée est de combiner les avantages des blocs en pyramides et de leurs bonnes dispositions géométriques à reprendre les imprécisions tout en permettant le porte-à-faux, comme le font les Droxels, et tout en utilisant le principe des blocs mâle-femelle.

Avantages :

Ces blocs permettent les porte-à-faux tout en garantissant des assemblages en Legos[®]. Tout comme pour les blocs mâle-femelle, leurs surfaces de reprise se situent à leurs extrémités, ce qui leur permet une bonne reprise des imprécisions et un bon glissement.

Enfin, les proportions géométriques nécessaires à cet élément pour permettre la reprise de l'imprécision en font un élément assez grand (1 m de long), ce qui permet un temps de pose plus faible.

Inconvénients :

Bien que l'idée soit théoriquement attrayante, elle pose plusieurs problèmes.

Ces blocs ne sont plus rectangulaires mais prennent des formes semblables à des T pour utiliser au maximum le potentiel de superposition des éléments en Legos[®] ; les blocs sont donc plus durs à entreposer de par leur base réduite.

Leur système de pose selon le principe mâle-femelle amène l'inconvénient du temps de pose plus élevé (qui compense donc la réduction du temps amenée par les dimensions élevées).

De plus, la géométrie et les proportions générales impliquent des dimensions élevées afin de reprendre les imprécisions requises ce qui impacte directement le poids. En effet, pour satisfaire aux exigences de reprise d'imprécisions de 5 centimètres avec cette géométrie, nous obtenons un élément de plus d'un mètre de long.

Enfin, la géométrie complexe de ces éléments amène une multitude d'arêtes d'épaisseur nulle ce qui le rend très difficile à mouler et très fragile.

Récapitulatif :

Avantages	Inconvénients
Porte-à-faux réduit mais possible sur 1 bloc Assemblages Legos® Bonne reprise des imprécisions	Entreposage Dimensions élevées pour reprendre les imprécisions Poids élevé Géométrie complexe Arêtes d'épaisseur nulle et difficulté de moulage

Tableau 1.7 – Avantages et inconvénients des Droxels-R

1.4 Conclusion

Forts de cette analyse sur les différents blocs existants nous pouvons en retirer les propriétés à conserver et à éliminer afin d'obtenir un bloc efficace. Celui-ci doit être léger, avoir une géométrie reprenant les imprécisions sans amener à des coins d'épaisseur trop faibles ni à l'apparition d'interstices tout en évitant si possible les blocs mâle-femelle.

Le récapitulatif de cette comparaison est repris dans le tableau 1.8. Le respect d'un critère est indiqué via un ✓ et le non respect d'un critère par un ✗. Afin que les blocs soient comparables entre eux et qu'une décision objective puisse être prise, nous avons imposé que les blocs reprennent les 5 cm d'imprécision utilisés comme hypothèse tout au long de ce travail. Les dimensions de certains blocs sont dès lors réhhibitoires, comme il a été expliqué précédemment.

Critères principaux	Cônes	Blocs coniques	Droxels & Droxels-T	Blocs pyramidaux	Blocs Mâle-Femelle	Droxels-R
Poids	✓✓	✓	✗	✓	✗	✗✗
Assemblage Legos®	✗✗	✓	✗	✓	✓	✓
Facilité de pose / glissement aisé	✓	✓	✗ ¹	✓ ²	✓ ³	✗ ³
Arêtes d'épaisseur nulle	✓	✓	✓	✗	✓	✗✗
Fabrication ⁴	✓ ⁵	✓ ⁵	✗✗	✓	✗	✗✗
Compatibilité du système de préhension ⁶	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Possibilités architecturales	✗✗	✓	✓✓ ⁷	✓	✗✗ ⁸	✗✗ ⁸

Tableau 1.8 – Comparatif des différentes solutions existantes

Commentaires

1. Comportement sur modèles réduits assez bon, mais résultats sur des éléments en béton à taille réelle peu concluants au vu des surfaces de reprise réduites.
2. En pratique, les essais nous montrent que le glissement n'est pas toujours garanti.
3. Supposé, les essais en laboratoire n'ayant pas pu être réalisés pour l'ensemble des blocs existants.
4. Les éléments présentant des particularités telles que des angles ou des surfaces arrondies étant difficiles à réaliser en laboratoire.
5. Les cônes de signalisation permettent un moulage aisé mais ne permettent pas un choix dans l'ouverture du cône.
6. En supposant l'utilisation du système de préhension utilisé lors des essais en laboratoire et présenté dans le chapitre 3. Notons que le choix d'imposer les 5 cm de reprise d'imprécision et donc l'augmentation des dimensions de certains blocs permet toujours le placement des plaques métalliques nécessaire au système de préhension.
7. Via l'utilisation de porte-à-faux, la géométrie n'étant pas parfaite mais les possibilités multiples.
8. Complexité de la géométrie.

Nous constatons que les blocs coniques présentent beaucoup d'avantages et nous pourrions être tentés de les utiliser. Ils ont cependant un gros défaut qui les rend non compétitifs, il n'est pas possible de construire autre chose que des colonnes avec ce type de blocs. L'avantage de la forme conique devient alors son inconvénient, le très bon glissement est dû au fait qu'il n'y a pas d'arête sur le cône mais cela empêche aussi de bloquer le bloc dans le bon axe. Une forme particulière de cône pourrait être développée avec une arête pour respecter cette condition mais cela amènerait à des formes complexes à mouler.

Notre choix s'est donc tourné vers les blocs pyramidaux auxquels nous allons apporter des améliorations qui sont développées dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

Développement du type de Drick retenu

Résumé

Dans ce chapitre, nous allons détailler le cheminement qui a été fait afin d'obtenir la géométrie finale de nos blocs. Les différentes améliorations apportées vont ainsi être expliquées et justifiées. Une fois la géométrie finale atteinte pour notre bloc type, nous allons détailler les blocs particuliers permettant un plus grand nombre de variantes architecturales ainsi que leurs spécificités.

2.1 Modèle de départ

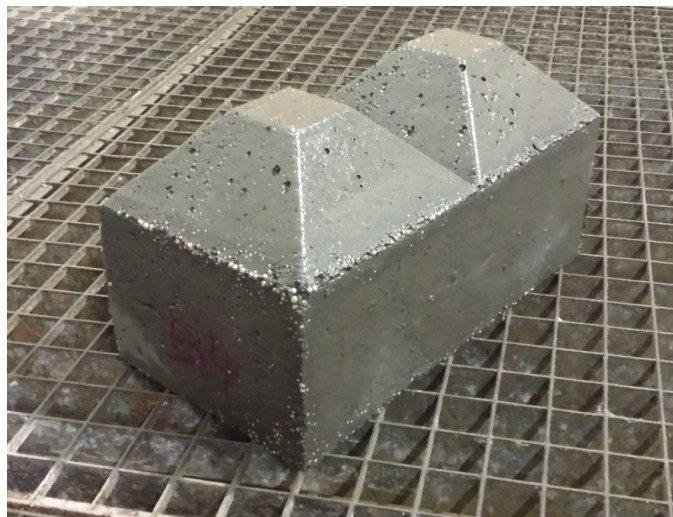


FIGURE 2.1 – Modèle de départ : les blocs pyramidaux

La comparaison précédemment réalisée et les conclusions tirées dans la section 1.4 nous ont menés à retenir les blocs pyramidaux. (Figure 2.1.) Ceux-ci présentent en effet des caractéristiques intéressantes tout en étant réalisables en laboratoire.

Plusieurs inconvénients sont cependant à corriger afin de se rapprocher d'un bloc idéal :

1. le problème du mauvais glissement ;
2. les arêtes d'épaisseur nulle ;
3. le poids superflu ;
4. les possibilités architecturales limitées.

2.2 Améliorations apportées

2.2.1 Augmentation de la pente

Ce problème est principalement rencontré sur les blocs pyramidaux avec des pentes de 45° (figure 2.2-a), celles-ci étant trop faibles que pour permettre un bon glissement des blocs les uns sur les autres. L'analyse de A. Naveau et A. Moncourrier [10] mène à la conclusion qu'il faut prendre des pentes suffisamment élevées pour que ce glissement soit acceptable (figure 2.2-b).[10] Une pente élevée amène cependant à des hauteurs de pyramides élevées pour reprendre l'imprécision des drones, un optimum est donc à trouver. (Figure 2.3.)

Nous avons opté pour une pente à 60° , celle-ci étant assez élevée pour permettre un glissement acceptable tout en n'amenant pas à des dimensions exagérées et, surtout, ces dimensions respectent les contraintes imposées par les tables d'impression des imprimantes 3D mises à notre disposition, comme l'explique le chapitre 5.

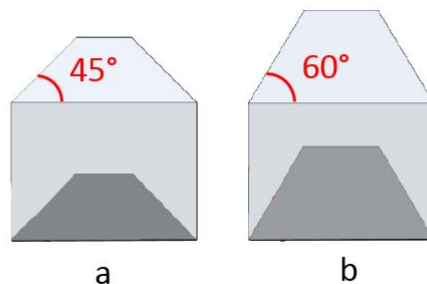


FIGURE 2.2 – Variation d'angle pour des blocs pyramidaux

Les essais en laboratoire réalisés avec les blocs pyramidaux ont cependant montré un comportement fort dépendant de la composition du béton utilisé. C'est pourquoi nous détaillerons les compositions testées dans le chapitre 4, et en particulier celles qui permettent de s'affranchir de cet inconvénient.

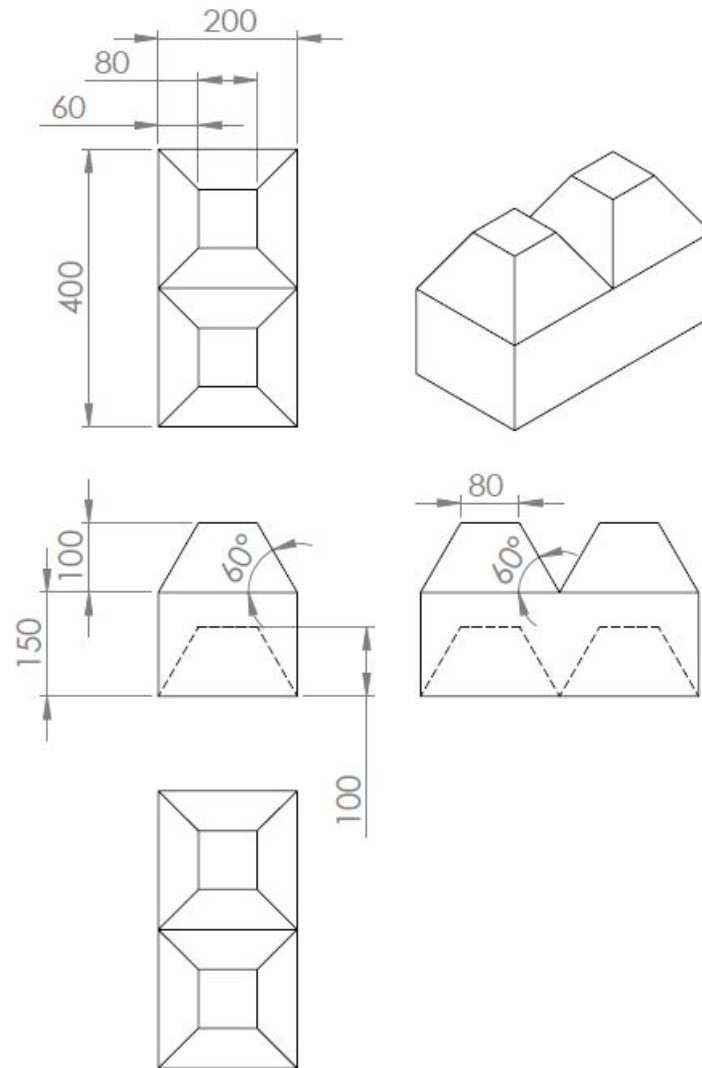


FIGURE 2.3 – Plan du modèle de départ (en mm)

2.2.2 Suppression des arêtes d'épaisseur nulle

Le problème des arêtes d'épaisseur nulle a été soulevé dans la section 1.2 et est illustré sur la figure 1.8. Il provoque des problèmes de moulage, de fini de surface et empêche le bon emboîtement des blocs. Une solution doit donc être proposée pour pallier ces nombreux défauts.

La première idée qui vient à l'esprit est de déplacer les pyramides au sommet des blocs et de les décaler de quelques centimètres par rapport aux extrémités du bloc. (Figure 2.4.) Cependant, cela ne règle en rien la solution. De fait, en faisant de la sorte, les surfaces de reprise adjacentes ne sont plus présentes et les blocs ne peuvent plus être placés correctement ce qui va directement à l'encontre des critères présentés dans le chapitre 1.

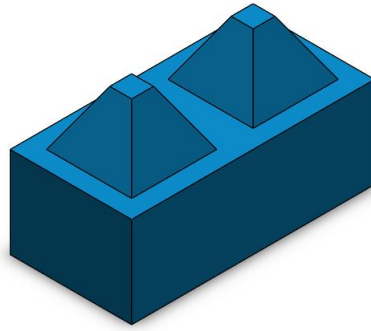


FIGURE 2.4 – Idée initiale pour éviter les épaisseurs nulles

Une piste de réflexion proposée par A. Naveau et A. Moncourrier [10] consiste en un remplacement de ces arêtes par une section plate ayant une épaisseur minimale, comme illustré sur la figure 2.5. Sur celle-ci les zones modifiées par rapport au plan du modèle de départ (figure 2.3) sont en rouge.

Après plusieurs essais en laboratoire, nous sommes passés d'une épaisseur de 1cm comme utilisée par A. Naveau et A. Moncourrier [10] à une épaisseur de 2cm. En effet, lors de la réalisation des blocs, une épaisseur de 1 cm ne permettait toujours pas de garantir une résistance suffisante des extrémités et un moulage aisé.

Malheureusement, cette solution appliquée seule amène un autre problème. En effet, sans autres modifications de géométrie les blocs placés les uns sur les autres, en assemblage de type Legos® ou en colonnes, ne se recouvrent pas complètement et un interstice est dès lors visible entre chaque rangée de blocs (figure 2.6). En plus de ne pas être esthétiques, ces interstices empêchent la partie inférieure du bloc supérieur de se poser correctement contre la partie supérieure du bloc inférieur. Ils réduisent donc de facto la capacité d'emboîtement des blocs ainsi que leur capacité à transmettre efficacement les efforts.

Par ailleurs, en analysant le fonctionnement des blocs et en particulier des surfaces de reprise, comme détaillé dans la section 1.1.2, nous avons pu résumer le rôle de chacune des pentes des pyramides de notre modèle. Sur la figure 2.7, nous avons analysé les deux possibilités de pose existantes : un bloc sur deux autres blocs d'une rangée inférieure (figure 2.7-a), et un bloc entre deux blocs de la même rangée (figure 2.7-b). On peut voir sur cette figure les surfaces de reprise descendantes en rouge, adjacentes en vert et les pentes des pyramides dont le rôle est inutile car redondantes en bleu. L'ensemble des rôles de chaque pente est représenté sur la figure 2.7-c.

Forts de cette analyse, nous pouvons tirer deux conclusions :

1. La partie située entre les deux pyramides inférieures (figure 2.7-c) peut être creusée afin de réduire le poids du bloc tout en supprimant les surfaces inutiles.
2. Les pentes intérieures des pyramides supérieures ne servent qu'à guider les blocs descendants de la rangée du dessus. On peut dès lors placer une zone plate entre ces deux pentes sans empêcher le bon glissement des blocs descendants. Si la largeur de ce plat est au moins égale à deux fois l'épaisseur des zones plates de la partie inférieure du bloc (présenté en section 2.2.2), cela permet aux deux blocs qui viennent s'y poser de bien s'emboîter et cela supprime de facto le problème des interstices présenté précédemment.

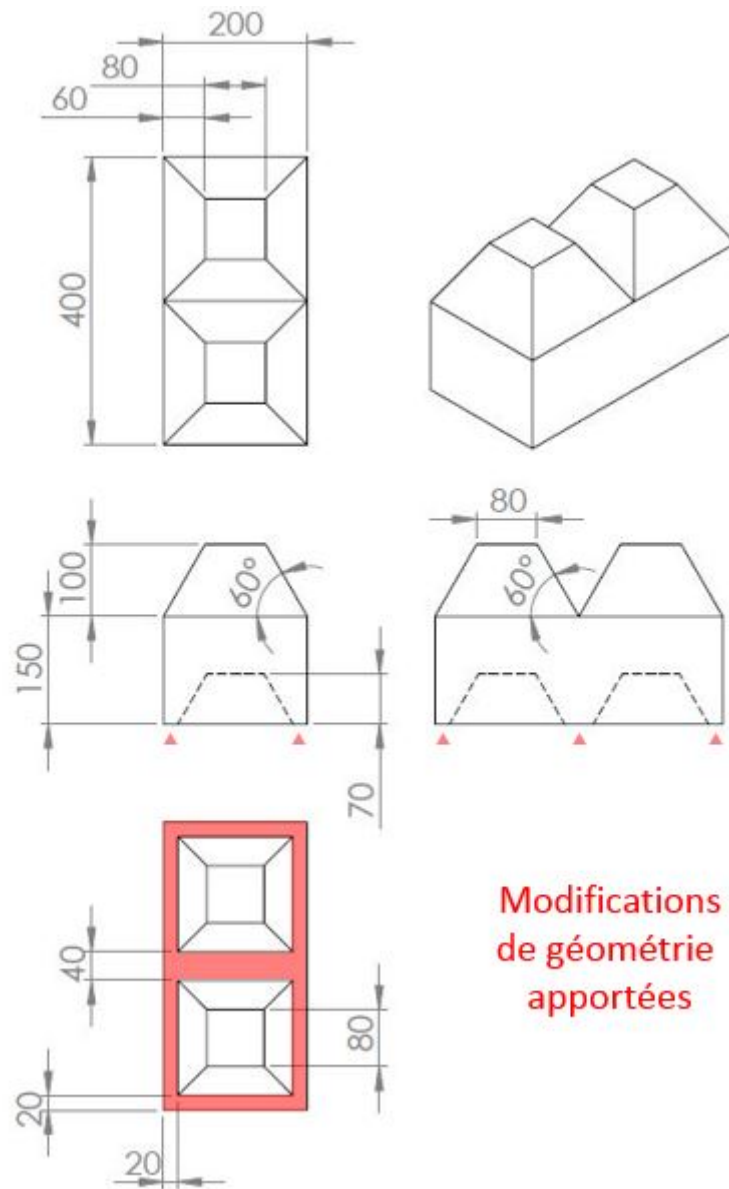


FIGURE 2.5 – Plan de la solution sans arêtes d'épaisseur nulle (en mm)

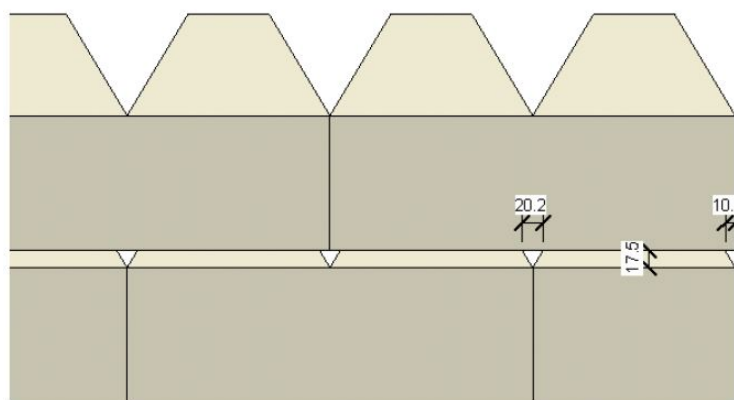


FIGURE 2.6 – Jour entre les rangées de Dricks (en mm)

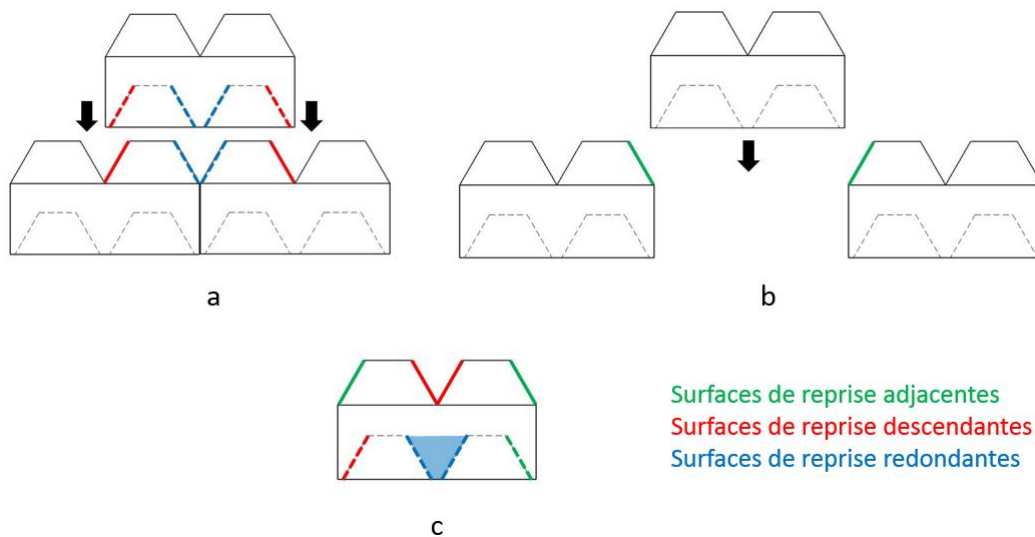


FIGURE 2.7 – Analyse des surfaces de reprise du modèle des blocs pyramidaux

Malheureusement, cette solution, bien que fonctionnant lorsque les blocs sont assemblés en type Legos®, ne permet pas leur empilement en colonnes¹.

Comme nous l'avons vu, la taille du plat sur la zone supérieure doit être au minimum égale à deux fois l'épaisseur des plats sur la partie inférieure du bloc. Cependant, dans la pratique, cette zone sur nos blocs est légèrement plus grande afin de permettre l'intégration du système de préhension. Ce choix est détaillé plus précisément dans le chapitre 3.

2.3 Réduction du poids superflu

Pour respecter la problématique récurrente du poids, nous avons décidé d'éviter au maximum notre modèle, en allant jusqu'à rendre le modèle creux. Cependant cette réduction de la masse totale du bloc amène à une réduction de la résistance. Il est dès lors important de trouver un équilibre entre ces deux paramètres. Nous avons donc enlevé un maximum de volume inutile ou ne participant pas directement à la reprise des imprécisions dans nos blocs et nous nous sommes laissé la liberté de compenser cette diminution de volume par une augmentation de la quantité de particules fines dans la composition de notre béton afin d'obtenir une résistance plus élevée et un meilleur fini de surface. Les détails de cette procédure sont abordés dans le chapitre 4.

La réduction de masse s'est faite en deux parties :

1. La jonction des deux parties creuses en forme de pyramide du bas du bloc en une seule. (Comme expliqué dans la section 2.2.2.)
2. La suppression d'un parallélépipède rectangle de matière au centre du bloc reliant le sommet des pyramides du dessus au sommet des pyramides creusées dans le bloc.

La nouvelle géométrie est visible sur la figure 2.8, les zones en couleurs représentent les nouvelles modifications par rapport à la géométrie de la figure 2.5.

1. Nous verrons cependant à la fin de ce chapitre qu'il est possible de faire un bloc complémentaire à la géométrie adaptée qui permet quand même l'empilement en colonne si nécessaire.

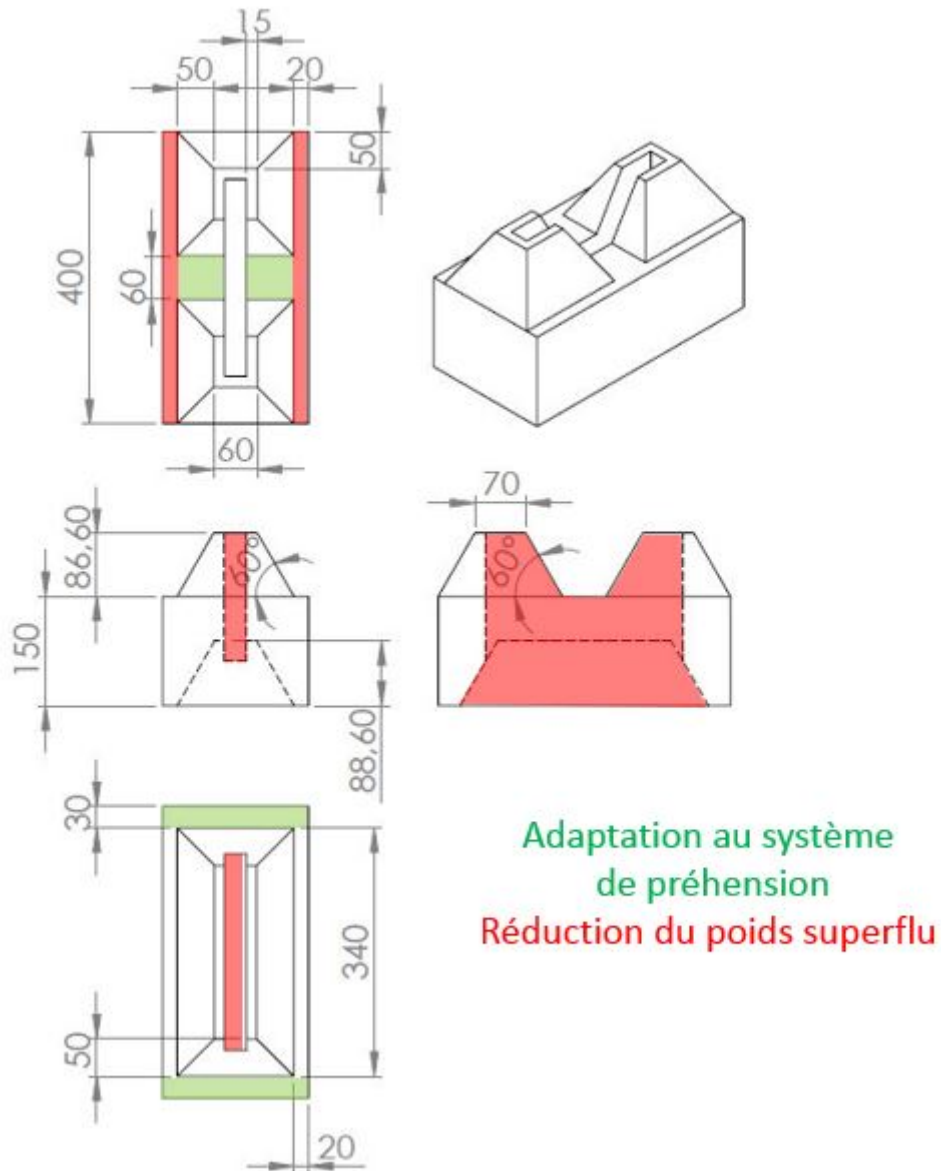


FIGURE 2.8 – Plan de la solution après suppression des arêtes d'épaisseur nulle et réduction du poids (en mm)

Cette réduction de matière à 5 impacts sur notre modèle :

1. une diminution directe de la masse totale ;
2. une réduction de la résistance du bloc ;
3. une nouvelle zone au sommet de nos pyramides ; supérieures concernées par le problème des arêtes d'épaisseur nulle ;
4. une complexification du moule ;
5. une nouvelle opportunité qu'est la possibilité de remplir nos éléments à posteriori.

Les points 3 et 5 méritent une explication complémentaire de par leur importance :

Concernant le point 3, nous constatons que le sommet de nos pyramides étant creusé afin de réduire le poids, de nouvelles arêtes d'épaisseur nulle apparaissent. (En rouge sur la figure 2.9.) Pour éviter ce problème, nous avons appliqué le même raisonnement que celui utilisé précédemment. Les dimensions du parallélépipède creusé depuis le sommet de nos pyramides supérieures doivent donc être adaptées pour laisser une épaisseur minimale.

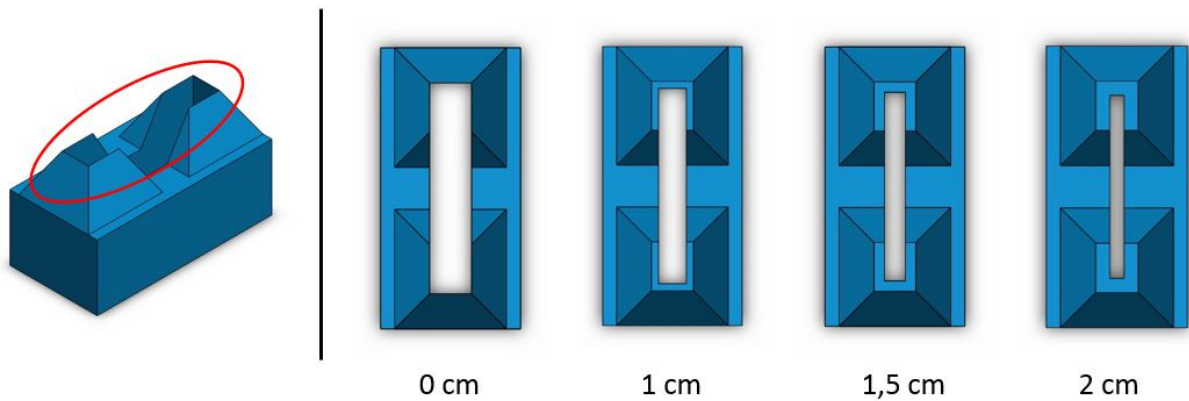


FIGURE 2.9 – Problème lié à l'évidage du bloc

Dans la pratique, cet espacement doit d'une part être suffisamment élevé que pour permettre un bon moulage, mais d'autre part, le plus faible possible que pour permettre une plus grande réduction de poids. Un équilibre a donc été trouvé et nous sommes arrivés à une épaisseur de 15 mm. (Figure 2.9.)

Quant au point 5, le fait de rendre les blocs creux, et grâce à la manière dont ils s'empilent, amène désormais la possibilité de remplir les blocs afin de mieux les liasonner et de renforcer leur résistance. Si l'on regarde un mur réalisé avec ce type de blocs, on se rend compte que les zones creuses des blocs se superposent et créent des sortes de gaines naturelles qui passent d'étage en étage. (En rouge sur la figure 2.10.)

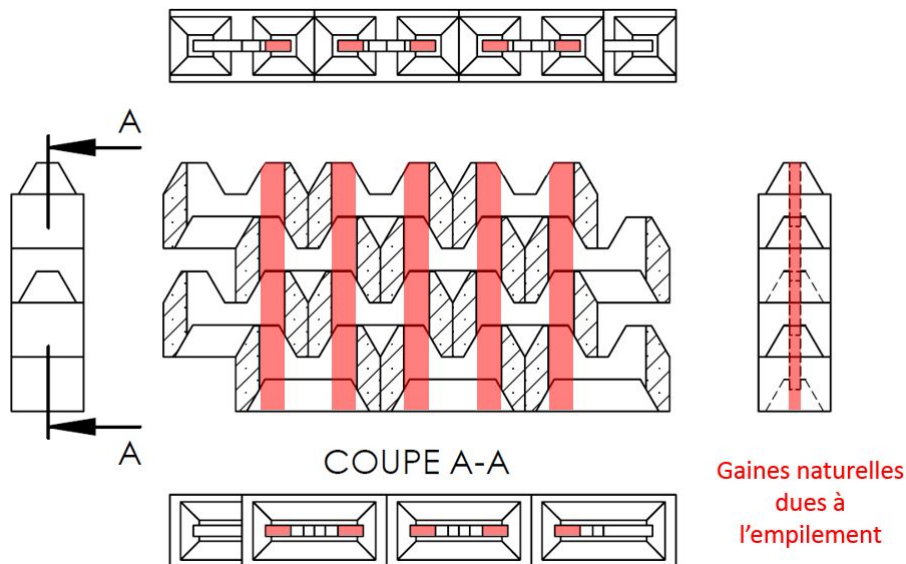


FIGURE 2.10 – Présence de gaines se formant lors de l'empilement de nos blocs

Cette gaine est un réel avantage, elle peut être utilisée comme gaine technique ou encore être remplie de béton pour renforcer la résistance des éléments ou de la structure globale. Certaines zones plus sensibles peuvent même être renforcées par des armatures et du béton pour permettre non seulement une meilleure reprise des efforts mais également la reprise d'efforts de traction plus importants.

Bien que le placement des armatures et la coulée du béton puissent sembler difficilement combinables à l'utilisation de drones à première vue, des solutions semblent possibles. En effet, les armatures, éléments assez lourds, pourraient être amenées en plusieurs parties et posées au fur et à mesure de la construction. La coulée quant à elle pourrait être faite par apport successif de petites quantités de béton ou réalisée en une seule phase à la fin de la construction par des pompes autonomes. Ces solutions sortent du cadre de ce travail et n'ont donc pas été développées dans celui-ci mais sont proposées en tant que pistes de réflexion dans le chapitre 4 et 6.3.5.

2.4 Améliorations supplémentaires

Adaptation au système de préhension :

Le système de préhension des blocs pyramidaux utilisés comme modèle de départ nécessite la mise en place de plaques métalliques au sommet de leurs pyramides. Malheureusement, les modifications que nous avons apportées à ces blocs, et en particulier la partie creuse au centre de ceux-ci, nous empêchent de placer ces plaques au sommet des pyramides. Il a donc été nécessaire de leur trouver un nouvel emplacement afin de garantir la bonne utilisation de notre système de préhension présenté dans le chapitre 3.

Pour ce faire, nous avons augmenté les dimensions de certaines zones horizontales afin de disposer d'une surface suffisante pour la mise en place des plaques métalliques. La surface horizontale située entre les deux pyramides au sommet du bloc, représentée en vert sur la figure 2.8, est passée d'une largeur de 4 à 6cm. Ce changement implique d'autres, également représentés en vert sur la figure 2.8 : l'épaisseur des parois inférieures est passée de 2 à 3cm, et donc également celles se situant sur le pourtour des pyramides.

Paramétrisation :

L'ensemble de nos modèles ont été réalisés sur *Solidworks*[®]. Ce programme de modélisation 3D permet d'imposer des contraintes géométriques à nos modèles, ce qui est indispensable à nos yeux pour garantir la possibilité d'emboîtement de nos éléments. *Solidworks*[®] permet en outre l'utilisation de paramètres géométriques. Cette fonctionnalité utilisée à bon escient permet d'adapter l'ensemble de la géométrie de notre bloc en fonction de certains paramètres clés.

L'imprécision, la hauteur, largeur et longueur de bloc ainsi que les pentes des pyramides ou les épaisseurs des différentes zones plates peuvent être adaptées et facilement modifiées. Lors du changement d'un de ces paramètres, l'ensemble des dimensions du bloc se modifie pour que le nouveau bloc puisse toujours s'emboîter et respecter toutes les contraintes abordées au début de ce chapitre.

Cette paramétrisation a été utilisée afin de pouvoir facilement adapter nos blocs en fonction des besoins spécifiques des projets constructifs ou des évolutions technologiques.

Par exemple, des dimensions adaptées pourront être imposées pour répondre aux caractéristiques des drones utilisés lors d'un projet particulier. De même, une modification de notre hypothèse de base de reprise de 5 cm d'imprécision dans chaque direction pourra facilement être modifiée si nécessaire dans le futur, si la précision des drones venait à s'améliorer, sans que l'on ait à redessiner l'ensemble du bloc.

Jeu :

En plus de la paramétrisation, nous avons rajouté à nos modèles du jeu (lui aussi modifiable en tant que paramètre) afin de rendre le modèle réalisable dans la pratique. Celui-ci permet de compenser les imprécisions dues au moulage. Ce jeu a été mis tant dans la direction horizontale que verticale. Pour ce faire nous avons simplement légèrement agrandi les dimensions de nos pyramides inférieures, les pyramides supérieures n'étant pas modifiées. La valeur de ce jeu est de 3 mm dans chaque direction.

emboîtement :

Après avoir réalisé des essais à taille réelle en laboratoire, nous nous sommes rendu compte que dans certains cas nos blocs se coinçaient avant d'arriver à leur position escomptée (figure 2.11). De plus, certains blocs correctement posés pouvaient encore bouger ultérieurement, ils n'étaient pas solidement fixés.



FIGURE 2.11 – Blocage lors des essais en laboratoire avec l'utilisation du drone

Pour permettre un meilleur glissement, nous avons essayé d'arrondir les arêtes intérieures de nos blocs mais sans réel succès. Il semble donc que le frottement trop important soit la cause de ces anomalies.

Afin que les blocs puissent reposer solidement sur les blocs sous-jacents, nous avons ajouté une partie verticale à la base de nos pyramides supérieures et inférieures. Cette "surélévation" des pyramides permet aux blocs de mieux glisser et de se bloquer une fois à leur position finale. Ces parties verticales sont représentées en rouge sur la figure 2.12. Nous espérons également qu'elles aident au glissement, ce qui sera confirmé ou infirmé par des tests en laboratoire et dont les conclusions seront disponibles au chapitre 6.

Notons enfin que nous avons ajouté une pente de 5° environ à la partie verticale des pyramides inférieures afin de faciliter la phase de démoulage comme expliqué dans le chapitre 4.

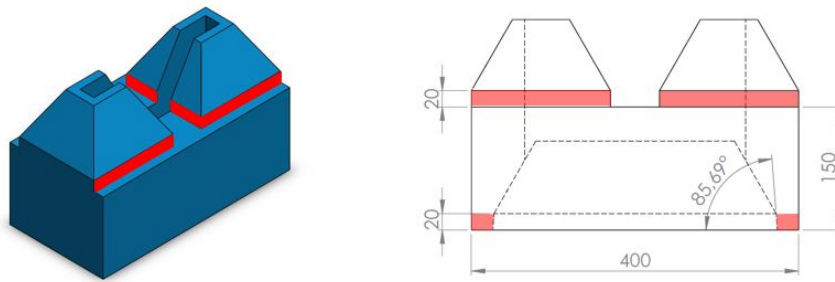


FIGURE 2.12 – Zone verticale permettant le bon emboîtement (en mm)

2.5 Modèle final

2.5.1 Les Dricks LP

L'ensemble des éléments présentés précédemment mis ensemble nous donnent notre modèle final, la Drick "Light Plus" classique (alias Drick LP). Le mot Drick est la contraction de "Drone-Compatible Brick" et désigne donc un élément constructif qui est compatible avec la construction par drones. LP vient de Light Plus. "Light" pour valoriser la réduction de matière apportée à ce modèle et "Plus" pour les modifications de géométrie présentées précédemment.

Les Dricks LP sont donc la traduction directe de nos différentes solutions aux contraintes présentées dans le chapitre 1, appliquées aux blocs pyramidaux proposés dans le mémoire de A. Naveau et A. Moncourrier. [10] Ceux-ci peuvent être comparés aux éléments de base de maçonnerie actuels que sont les blocs de béton standards disponibles dans le commerce mais adaptés à l'utilisation des drones.

Les arêtes d'épaisseur nulle dorénavant supprimées, le poids inutile réduit et le glissement amélioré, il ne reste qu'à adapter ce modèle aux éléments de maçonnerie classiques pour solutionner l'ensemble des inconvénients des blocs pyramidaux utilisés au départ de notre réflexion. Ceci fait l'objet de la section 2.5.2

Ce bloc semble, à nos yeux, "drone-compatible", ne présente plus d'inconvénient notoire et pourrait tout à fait être produit et utilisé de manière industrielle dès demain. (Figure 2.13 & 2.14.)

2.5.2 Adaptation aux éléments de maçonnerie classique

Maintenant que la géométrie d'un bloc type à été fixée pour répondre aux multiples contraintes liées aux drones, il nous reste à régler le problème des possibilités architecturales limitées. Pour ce faire, nous avons décidé de transposer notre modèle aux différents éléments classiques de maçonnerie que sont :

- les blocs d'angle ;
- les éléments de linteaux ;
- les colonnes ;
- les éléments d'intersections de murs.

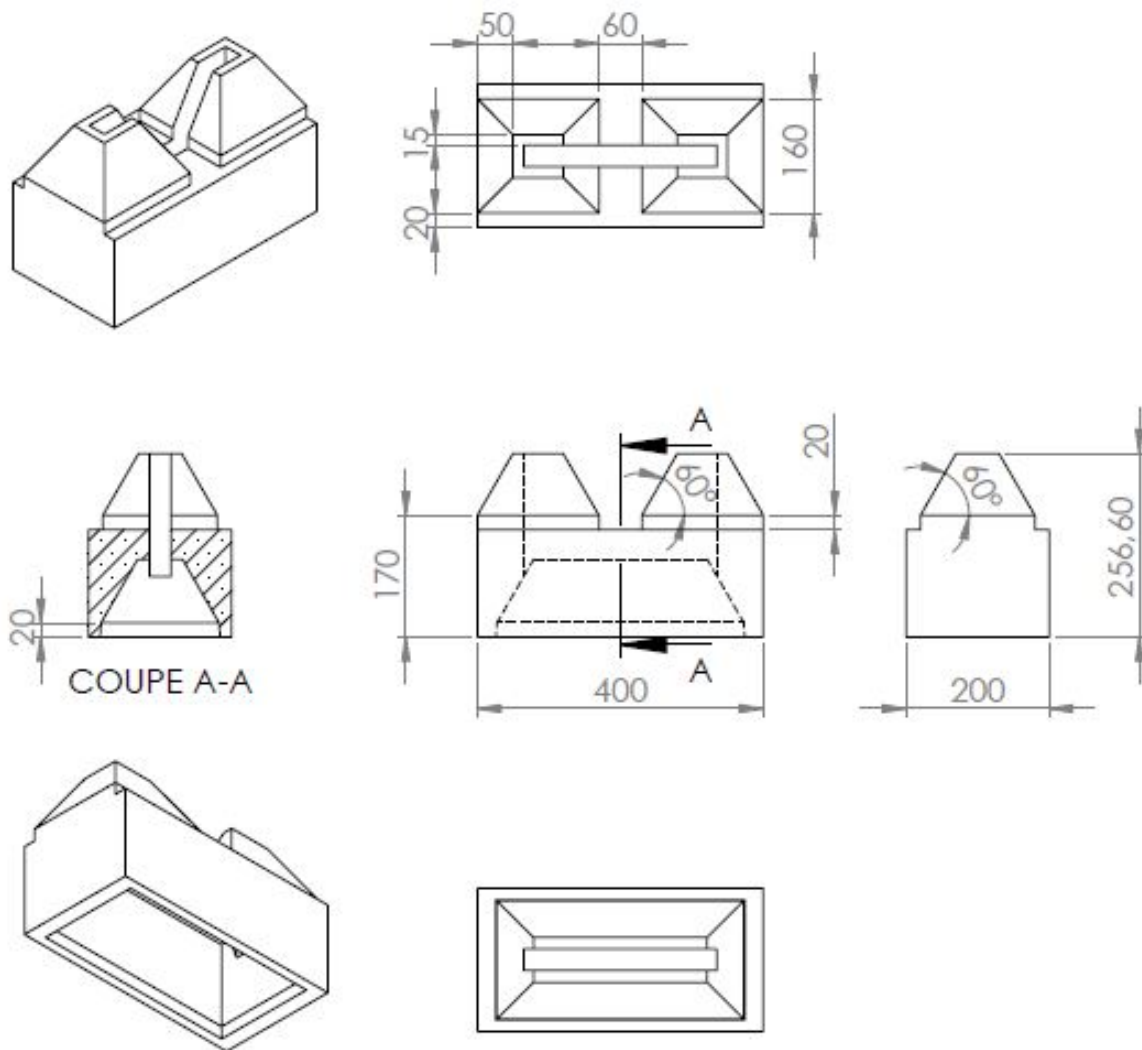


FIGURE 2.13 – Drick LP (en mm)

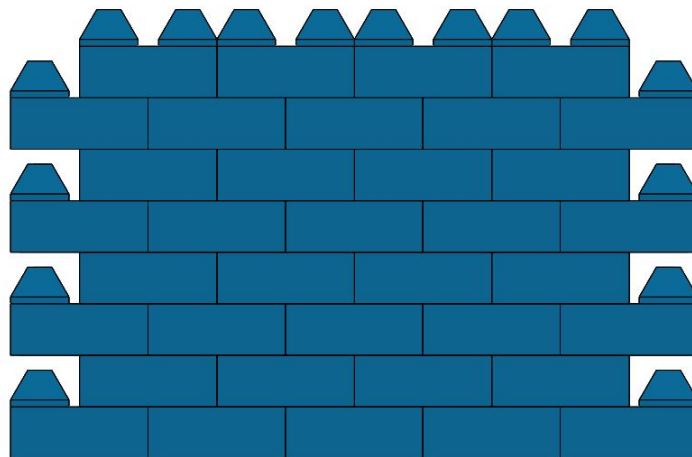


FIGURE 2.14 – Exemple de mur réalisé avec des Dricks LP

Ceux-ci ont été conçus et dimensionnés au vu des critères géométriques définis précédemment afin de les rendre drone-compatibles. Nous en avons ressorti dix éléments répartis dans cinq grandes familles et pour lesquels nous avons défini une nomenclature simplifiée. Ces cinq familles commencent toutes par l'acronyme LP ("Light Plus").

- l'élément basique : LP ;
- les blocs d'angle : LPA ;
- les éléments de linteaux : LPL ;
- les colonnes : LPC ;
- les éléments d'intersections de murs : LPB.

Ces familles sont présentées dans les sections suivantes et, par souci de clarté, nous invitons le lecteur à consulter l'Annexe A.1 pour disposer des mesures et plans détaillés de chaque élément.

Les Dicks LPA :

Les Dricks LPA, Light Plus Angle, sont l'adaptation des Dricks LP aux éléments d'angle. Dans la famille des Dricks LPA, deux blocs sont à différencier. Le LPAL pour Light Plus Angle Left et le LPAR pour Light Plus Angle Right. Chacun permettant alors de faire un élément de coin partant vers la droite ou vers la gauche comme illustré sur la figure 2.17.

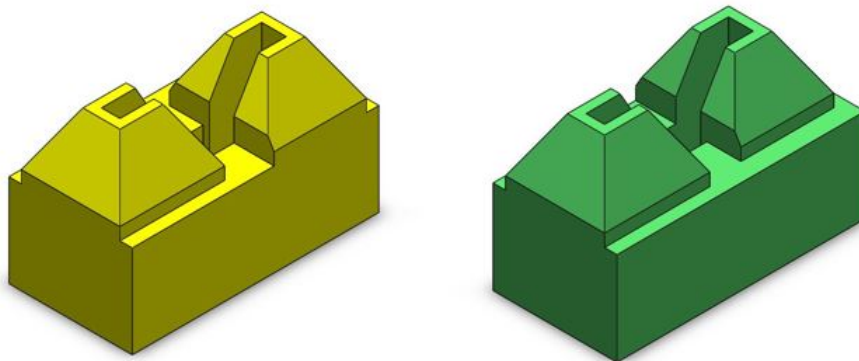


FIGURE 2.15 – Dricks LPAL et LPAR

Les différences entre les Dricks LP et les Dricks LPA viennent du placement des surfaces de reprise adjacentes ainsi que du positionnement des zones plates associées à la suppression des arêtes d'épaisseur nulle.

En effet, emboîter deux Dricks LP à angle droit n'est pas possible car, pour ce faire, la surface de reprise adjacente doit être elle aussi tournée de 90° pour permettre la mise en place du bloc adjacent (surface rouge sur la figure 2.16 a et d). De même, les zones plates situées sur les sommets du bloc doivent être, elles aussi, tournées de 90° afin de permettre le bon empilement. Les épaisseurs de 2 cm (en vert sur la figure 2.16) et les épaisseurs de 3 cm (en bleu sur la figure 2.16) ne sont plus positionnées aux mêmes endroits.

Notons enfin que pour permettre le bon fonctionnement de notre système de préhension (comme expliqué dans le chapitre 3) nous avons élargi la zone centrale de 5 cm à 6 cm afin de garantir une surface nécessaire à la mise en place de plaque métallique (couleur mauve sur la figure 2.16-d). Cela n'impacte cependant en rien les imprécisions reprises.

Une explication simplifiée est d'imaginer le bloc être coupé en deux dans le sens de la largeur et de faire tourner l'une des deux parties de 90°. Les géométries des deux parties du bloc sont alors adaptées aux deux directions de pose. (Figure 2.16.)

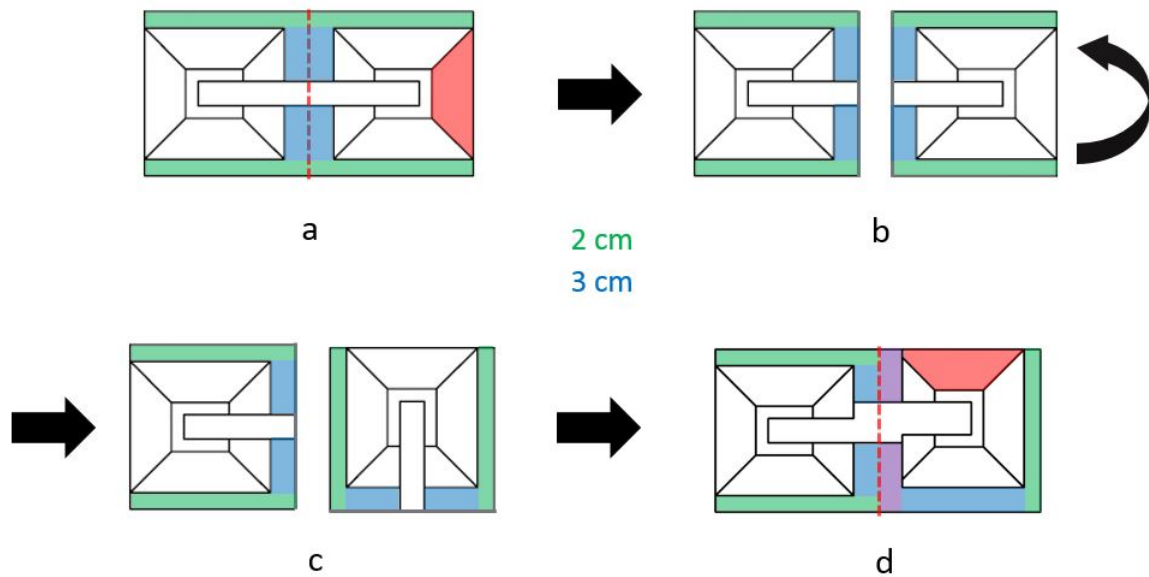


FIGURE 2.16 – Adaptation d'une Drick LP en Drick LPAL

Une fois le raisonnement réalisé pour un angle droit dans une direction, nous pouvons le réitérer dans l'autre direction et obtenir les deux blocs d'angle LPAL et LPAR. Un empilement des Dricks LPAL et LPAR permet ainsi de former des murs d'angle comme illustré sur la figure 2.17.

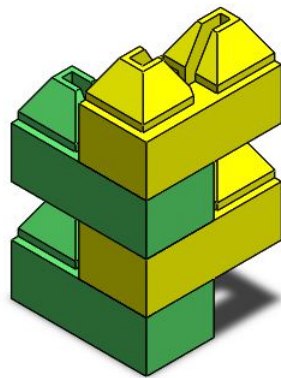


FIGURE 2.17 – Exemple d'un mur de coin en Dricks LPAL et LPLAR

Les Dricks LPL :

Les Dricks LPL sont les adaptations des Dricks LP aux éléments de linteaux. Par éléments de linteaux nous entendons les éléments nécessaires à la mise en place d'ouvertures dans nos murs (des portes, des fenêtres, etc.). Dans la famille des LPL on retrouve quatre éléments distincts, visibles sur les figures 2.18, 2.19 et 2.20, les LPLT, LPLD, LPLA et LPLS.

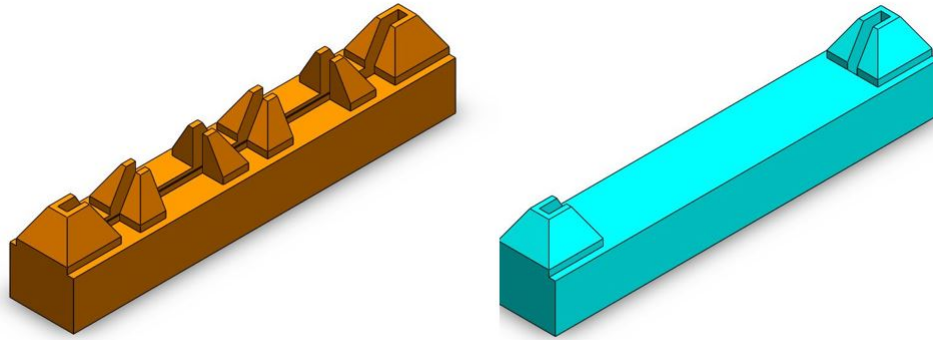


FIGURE 2.18 – Dricks LPLT et LPLD

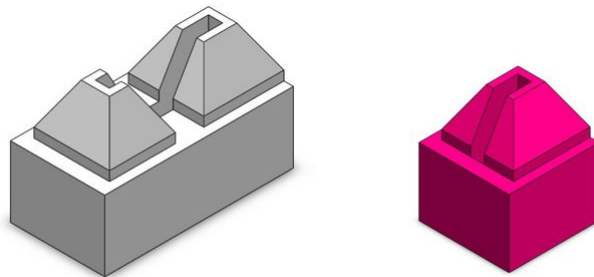


FIGURE 2.19 – Dricks LPLS et LPLA

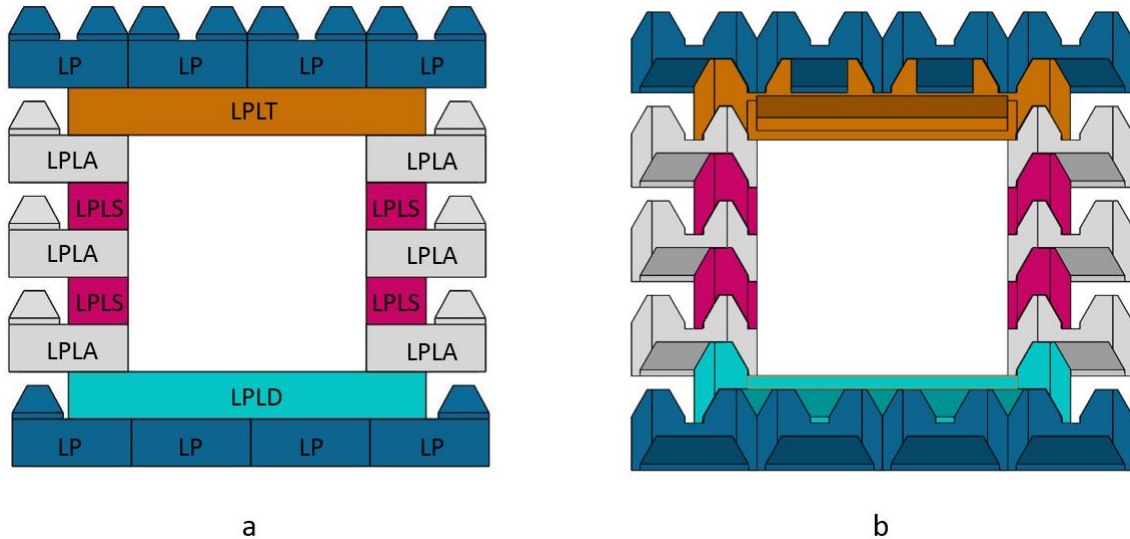


FIGURE 2.20 – Exemple d'une ouverture utilisant l'ensemble des Dricks LPL

Les deux premiers, les plus évidents, sont le linteau (LPLT : Light Plus Lintel Top) et l'appui de l'ouverture (LPLD : Light Plus Lintel Down). (Figure 2.18.) Ceux-ci font trois blocs de longueur afin de permettre une ouverture utile de deux blocs de large étant donné que deux demi-blocs sont nécessaires à chaque extrémité pour l'empilement de blocs inférieurs et supérieurs. (Figure 2.20.) Ces linteaux permettent donc des ouvertures de 80 cm mais les dimensions de nos blocs peuvent être adaptées afin de permettre des ouvertures plus grandes.

Le LPLT est évidé en son centre afin de l'alléger au maximum car celui-ci est l'élément le plus lourd de tous nos modèles. Une attention particulière a donc dû être apportée au poids tout en garantissant une épaisseur de béton suffisante dans toutes les directions pour garantir sa résistance (épaisseurs de 1 à 3 cm en rouge sur la figure 2.21). Avec cette forme particulière, le LPLT peut être rempli, comme expliqué dans la section 2.3, sans que le fluide de remplissage vienne s'écouler dans l'ouverture car celui-ci n'est pas troué dans sa partie inférieure. Enfin, sur le LPLT, les surfaces de reprise adjacentes des quatre pyramides centrales ont été supprimées, car devenues inutiles. (Figure 2.21.)

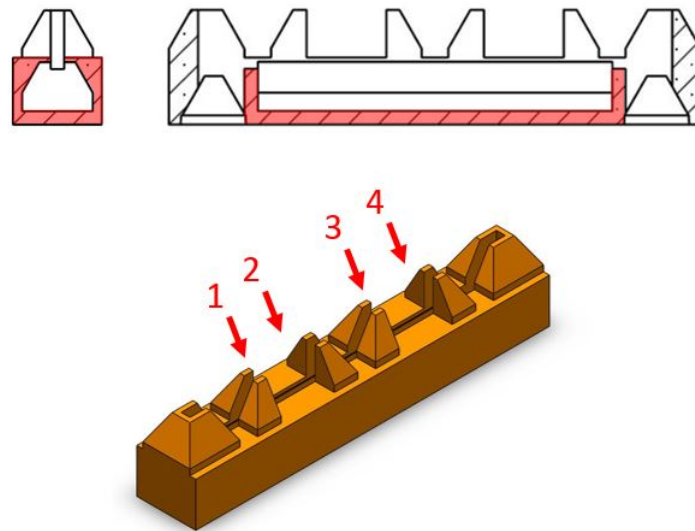


FIGURE 2.21 – Coupe dans l'extrusion particulière du LPLT et surfaces de reprise adjacentes inutiles supprimées sur les 4 pyramides du LPLT

La Drick LPLD quant à elle est une version allongée de la Drick LP. Elle ne présente pas de partie creuse sur sa partie supérieure afin d'être utilisée comme appuis de nos ouvertures. Notons que cet élément pourrait être remplacé par un élément de coque qui viendrait se poser sur les pyramides des blocs inférieurs. Cela permettrait d'éviter la mise en place du LPLD qui, étant plus long, est plus lourd. Cet élément devrait cependant disposer d'une géométrie particulière afin de pouvoir venir se placer correctement.

Les deux éléments suivants sont le LPLA (Light Plus Lontel Adapted) et le LPLS (Light Plus Lintel Single). (Figure 2.19.) Ceux-ci servent à terminer un mur droit. Dans ce cas, les surfaces de reprise adjacentes au niveau du mur qui se termine ne sont plus nécessaires car aucun bloc ne devra venir se poser à côté d'eux. En place de cette surface inutile déplacée, une arête plane est maintenant nécessaire pour éviter une arête d'épaisseur nulle et la bonne pose du bloc supérieur. (Figure 2.20.)

Les Dicks LPC :

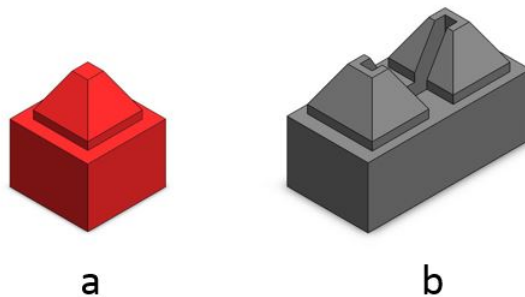


FIGURE 2.22 – Dricks LPCS et LPCD

Les Dricks LPCS (Light Plus Column Single) et les Dricks LPCD (Light Plus Column Double) sont les adaptations les plus simples de nos Dricks LP. Ceux-ci permettent la construction de colonnes simples et doubles (figure 2.23). Pour se faire, un plat constant de 3 cm d'épaisseur est présent sur tout leur contour afin de supprimer toutes surfaces de reprise adjacentes tout en permettant d'éviter les arêtes d'épaisseur nulle. Ces éléments ne permettent donc pas le placement de blocs de manière adjacente. Le LPCS ayant des dimensions et un poids réduit, celui-ci n'est pas complètement évidé.

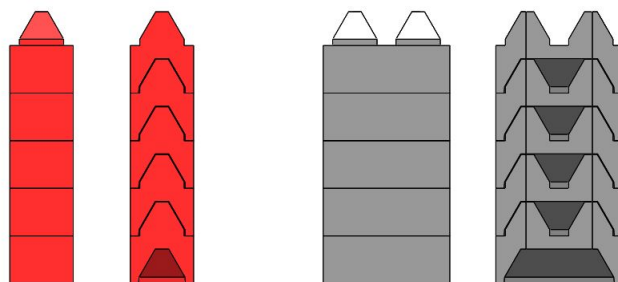


FIGURE 2.23 – Exemple d'utilisation des Dricks LPC, en rouge les LPCS et en gris les LPCD

En plus de colonnes classiques, ces éléments peuvent être utilisés pour certaines particularités architecturales, par exemple, pour le support de fenêtres doubles. (Figure 2.24.)

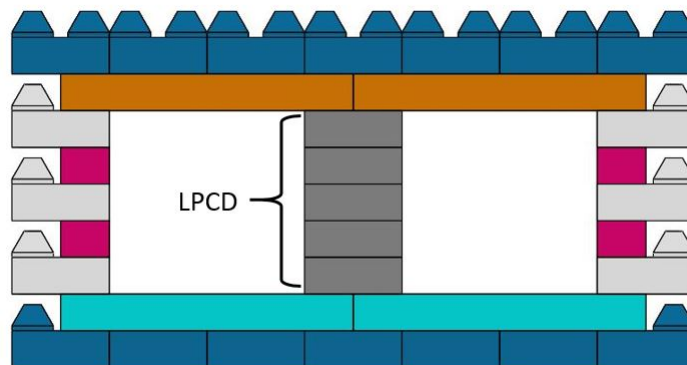


FIGURE 2.24 – Exemple d'utilisation particulière du LPCD pour des fenêtres doubles

Les Dicks LPB :

Enfin, la Drick LPB (Light Plus Beam), est un élément qui permet le raccord de 2 murs perpendiculaires (figure 2.25-a). Ces blocs permettent d'assurer un rôle que ne peuvent assurer les LPA, raccorder un mur perpendiculairement à un mur déjà existant. Les Dricks LPA ne permettent en effet que de créer un angle dans un mur sans que ce mur soit poursuivi au-delà de l'angle. (Figure 2.25-b.)

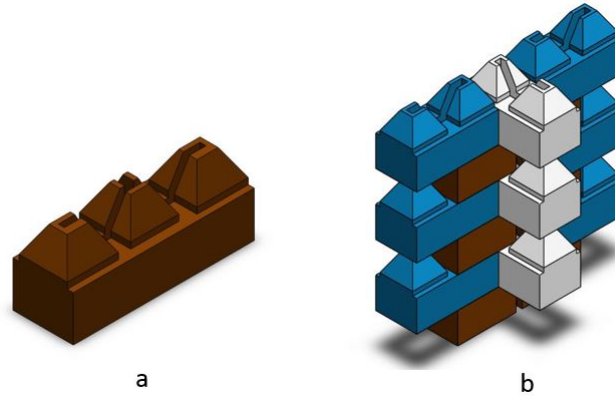


FIGURE 2.25 – Dricks LPB et exemple de leur utilisation

2.6 Récapitulatif

La Drick LP se présente comme la solution industrielle viable à la problématique de la construction drone-compatible de maisons unifamiliales en maçonnerie et en béton. Pour assurer des possibilités architecturales suffisantes elle a cependant été déclinée en 10 éléments différents, classés dans 5 familles et qui, assemblés, permettent de réaliser des structures telles que celle illustrée par la figure 2.26. L'ensemble des 10 éléments et des 5 familles de Dricks LP sont repris dans le tableau 2.1.

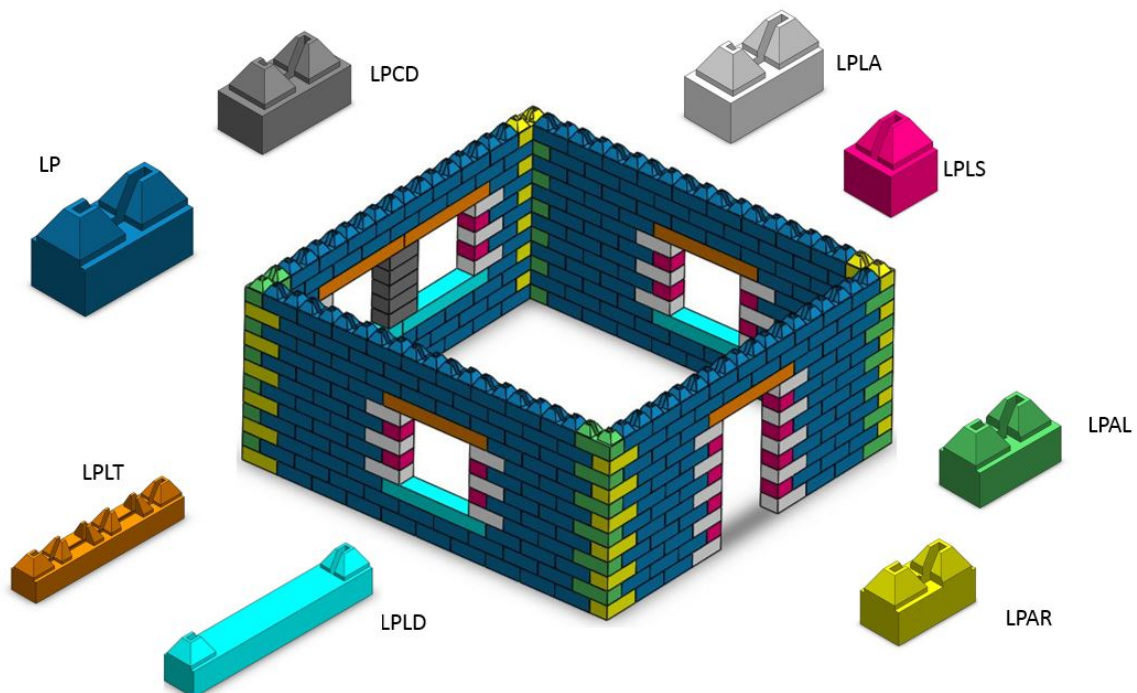

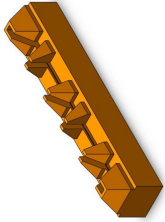
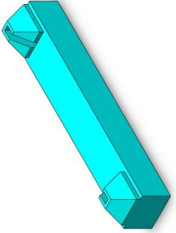
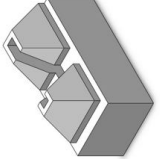



FIGURE 2.26 – Exemple d'utilisation des Dricks pour la construction de maisons unifamiliales

		LPL			
Famille	LP	LPLT	LPLD	LPLA	LPLS
Acronyme	LP	LPLT	LPLD	LPLA	LPLS
Nom complet	Light Plus	Light Plus Lintel Top	Light Plus Lintel Down	Light Plus Lintel Adapted	Light Plus Lintel Single
Illustration					

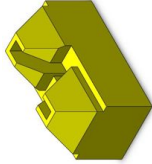



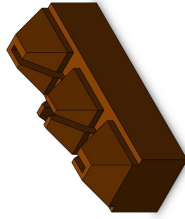
		LPA		LPC	
Famille	LPAR	LPAL	LPC	LPCD	LPB
Acronyme	LPAR <td>LPAL <td>LPC <td>LPCD <td>LPB </td></td></td></td>	LPAL <td>LPC <td>LPCD <td>LPB </td></td></td>	LPC <td>LPCD <td>LPB </td></td>	LPCD <td>LPB </td>	LPB
Nom complet	Light Plus Angle Right	Light Plus Angle Left	Light Plus Column	Light Plus Column Double	Light Plus Beam
Illustration					

Tableau 2.1 – Récapitulatif des Dricks LP

Chapitre 3

Systeme de prehension

Resume

Un bloc drone-compatible, aussi bon soit-il, ne trouve de sens à son existence que s'il est possible de le soulever, le transporter et automatiquement le lâcher lorsqu'il est à l'endroit où il est censé être. En effet, le fait qu'un bloc soit prehensible ou non est un critere majeur, tout aussi important, si non plus, que le fait que le bloc puisse reprendre des imprécisions de positionnement.

Ce chapitre tente de mettre en exergue cette importance à travers les différentes solutions pensees, developpees et construites qui ont permis de soulever les Dricks LP.

3.1 Caracteristiques d'un bon systeme de prehension

Afin de pouvoir determiner s'il est interessant de poursuivre le developpement d'un concept de systeme de prehension plutot qu'un autre, il est necessaire de definir une serie de criteres permettant de realiser un choix objectif. Nous avons identifie les criteres suivants :

1. l'efficacite de la prehension ;
2. l'efficacite de la pose ;
3. la possibilite de compenser les imprécisions de ; position du drone
4. le poids du dispositif ;
5. l'encombrement du dispositif ;
6. le cout du dispositif ;
7. la necessite ou non d'adapter le bloc.

Le critere le plus important, non mentionne dans la liste ci-dessus, est celui de la securite. En effet, il est primordial que l'operation de transport des blocs par le drone soit realisee à l'aide d'un systeme qui soit le plus simple possible et ne se base pas sur une source d'energie pour fonctionner. L'ideal etant un systeme qui, par defaut, empêche le bloc de tomber en vol. Nous considererons ici exclusivement de tels systemes.

3.2 Système d'électroaimants

3.2.1 Présentation

Un système pourvu d'électroaimants, comme celui utilisé par P. Latteur et S. Goessens [11] dans le cadre de la construction de colonnes grecques repose sur le principe d'aimants dits électropermanents (figure 3.1).



FIGURE 3.1 – Exemple d'électroaimant [16]

L'aimant électropermanent produit constamment un champ magnétique et ce n'est que lorsqu'un courant électrique parcourt la bobine qui l'entoure qu'un champ magnétique opposé en sens et intensité est produit et annule son pouvoir d'aimantation.

3.2.2 Avantages

Les avantages d'un tel système sont nombreux. En effet, il répond favorablement à 5 des 7 critères définis précédemment.

Expliquons brièvement de quelle façon il répond aux différents critères :

Efficacité de la préhension et de la pose :

Si l'on prend l'hypothèse que l'aimant est parfaitement en face de la surface métallique qu'il a à soulever, la préhension se fait automatiquement. Cela facilite les choses étant donné que dès l'instant où le drone sera suffisant bien en place que pour soulever le bloc, il le fera. De plus, l'aimant étant permanent, rien ne peut venir perturber son bon fonctionnement. La dépose quant à elle est également d'une grande simplicité puisque, comme expliqué précédemment, un courant électrique suffit à faire perdre toute aimantation à l'aimant pour un coût énergétique faible. Ce courant peut être fourni par le drone via une modification mineure de la circuiterie.

Compensation des imprécisions de position du drone :

Nous sommes à nouveau en présence de l'un des gros points forts du système de préhension par électroaimants. La taille réduite des électroaimants permet de les intégrer à des systèmes de guidage tels que des capots et permet virtuellement de s'adapter à n'importe quel type de bloc. C'est cette technique que S. Goessens et P. Latteur ont utilisée lors de leurs essais. [11]

Poids et encombrement du système :

Là encore, le système par électroaimants bat toute concurrence. En effet, le poids réduit des électroaimants, moins d'un demi-kilogramme d'après une brève étude de marché, permet de les rendre presque négligeables pour le drone les utilisant comme système de levage.

Enfin, l'encombrement du système est celui du capot servant de guide. Le levage se faisant par le dessus du bloc à soulever, les côtés sont laissés libres et toutes les positions de blocs peuvent être envisagées.

3.2.3 Inconvénients

Les deux inconvénients du système de levage par électroaimants sont liés :

Nécessité d'adapter les blocs et augmentation du prix :

Le premier désavantage majeur de ce système tient du fait qu'il est nécessaire d'adapter les blocs. En effet, non seulement ils doivent être équipés d'une plaque métallique bien ancrée, mais il faut également prévoir assez de place pour que les aimants puissent arrimer la plaque métallique. Pour ce faire, de la place doit être prévue lors du design des blocs. Cela complexifie le processus de moulage. Les plaques métalliques utilisées doivent également être assez planes et propres.

Les blocs adaptés étant pourvus de plaques métalliques, leur coût augmente. Ceci représente le second désavantage majeur de la méthode. En conclusion de ce chapitre, nous tâcherons de voir si le surcoût entraîné par cette technique est rédhibitoire ou non.

3.2.4 Récapitulatif

Le tableau 3.1 reprend les différents critères et, selon que la case correspondante soit rouge ou verte, indique si la méthode y répond favorablement ou non.

Critère	
Préhension facile	✓
Pose facile	✓
Reprise des imprécisions	✓
Poids	✓
Encombrement	✓
Coût	✗
Nécessité d'adapter le bloc	✗

Tableau 3.1 – Tableau récapitulatif des avantages et inconvénients du système de préhension par aimants

3.2.5 Système développé et testé en laboratoire

Dans le cadre des essais réalisés au LEMSC le 19 mai 2017, un système de préhension utilisant le principe des aimants électropermanents a été utilisé pour lever, transporter et poser des Dricks LP. Les photographies composant la figure 3.2 en sont une illustration.

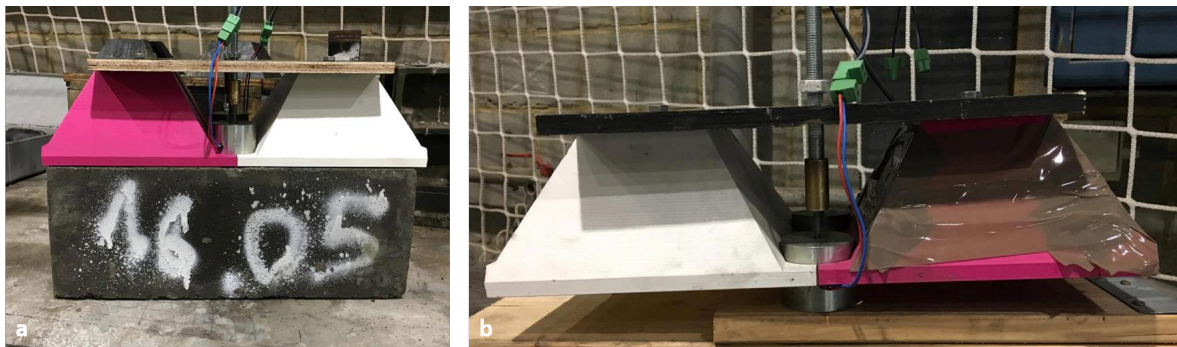


FIGURE 3.2 – a - Système de préhension attaché au bloc b - Système de préhension décroché

Celui-ci est composé de quatre parties. Les deux premières, imprimées en 3D, forment un capot servant de guide. Le guide a pour dimensions intérieures les dimensions des pyramides des Dricks LP, augmentées d'un jeu de 0.5 centimètre. Le capot est attaché à une planche de bois renforcée d'une plaque métallique. Cette planche est elle-même solidaire des deux électroaimants attachés au drone. Notons qu'il est recommandé de laisser un peu de flexibilité au système en desserrant légèrement les vis composant le système. Cela permet de rendre le système légèrement déformable et évite de déstabiliser le drone au moment de la préhension. Les conclusions des essais réalisés sont tirées dans le chapitre 6

3.3 Système de pince de levage

3.3.1 Présentation

Le système de pince de levage est un système classiquement utilisé par les professionnels de la manutention. Il consiste en deux pinces qui se croisent selon un axe et qui, lorsque l'on tire dessus, se referment. Plus l'objet soulevé est lourd, plus la pince appuie alors sur ses parois. Le frottement mobilisé entre les parois du bloc à soulever et les mâchoires de la pince permet alors le levage. La figure 3.3 est un exemple de pince de levage développée au LEMSC.

3.3.2 Avantages

Système utilisable avec tout type de bloc :

L'avantage majeur d'un tel type de système de levage est qu'il est valable pour n'importe quel type de bloc. Le bloc, pourvu qu'il soit muni de surfaces planes suffisamment larges et parallèles, peut être soulevé à l'aide d'une pince de levage sans que celle-ci, ni le bloc, ne subissent de modification.

A. Naveau et A. Moncourrier [10] ont développé une pince de levage pouvant être utilisée par un drone. Celle-ci est également utilisable pour soulever les Dricks LP et est illustrée en figure 3.3.

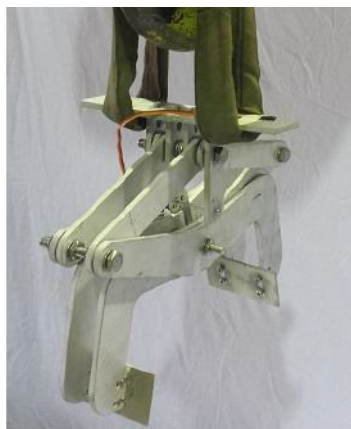


FIGURE 3.3 – Système de pince levage pour blocs développé au LEMSC [10]

Coût du système :

La simplicité du système en fait un candidat idéal pour être réalisé en laboratoire et en fait un choix peu onéreux.

3.3.3 Inconvénients

Compensation des imprécisions de position du drone :

Étant donné que nous n'avons pas pu réaliser des tests avec le drone en utilisant cette technique, nous émettons une réserve quant au fait que la méthode puisse fonctionner si le drone attaque le bloc à soulever avec un angle, bien que théoriquement cela soit possible.

Poids et encombrement :

Le défaut majeur de cette technique de préhension est le poids du système et son encombrement. La pince de levage développée au LEMSC [10] a une masse de 3.38 kg, une masse non négligeable étant donné les restrictions imposées sur la charge utile transportable. (Section 1.1.1.)

L'encombrement engendre un problème majeur inhérent à ce type de système de levage : l'impossibilité de faire des coins ou de placer des blocs parallèlement les uns par rapport aux autres. Les mâchoires de la pince empêchent alors de se mettre contre le bloc adjacent. La figure 3.4 illustre le phénomène. Ce phénomène s'étend aux zones de stockage où, lorsque les blocs sont les uns contre les autres, la pince ne dispose pas de place pour venir les saisir.

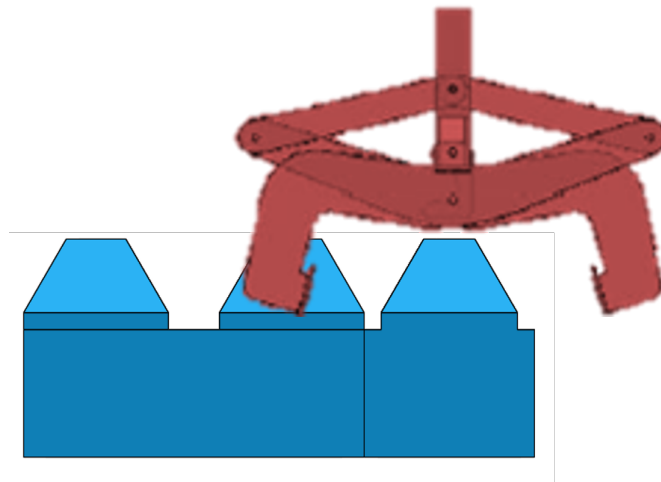


FIGURE 3.4 – Illustration des problèmes liés à l'encombrement du système de pince de levage.

Difficulté de pose :

Lors de l'opération de pose, afin que le bloc soit totalement libéré de la pince, il est nécessaire que plus aucune force ne soit exercée sur le système. Pour ce faire, le drone doit descendre un peu plus bas que nécessaire et être le plus stable possible. De plus, le système est automatique : que le bloc soit bien placé ou non, une mauvaise manoeuvre du drone peut entraîner la libération du bloc.

3.3.4 Récapitulatif

Le tableau 3.2 reprend les différents critères et, selon que la case correspondante soit rouge ou verte, indique si la méthode y répond favorablement ou non.

Critère	
Préhension facile	✓
Pose facile	✓
Reprise des imprécisions	✗
Poids	✗
Encombrement	✗
Coût	✓
Nécessité d'adapter le bloc	✓

Tableau 3.2 – Tableau récapitulatif des avantages et inconvénients du système de préhension par pince de levage

3.4 Système gonflable

3.4.1 Présentation

Lors du développement des Dricks LP, lorsqu'il est apparu qu'il était judicieux de creuser les blocs, nous nous sommes penchés sur la possibilité d'utiliser cette caractéristique pour le système de levage du bloc. Nous avons alors pensé à un système de membrane gonflable s'insérant dans l'orifice creux du bloc. Une fois la membrane en place et gonflée, le frottement entre les faces intérieures du bloc et la membrane elle-même pourrait alors permettre son levage. (Figure 3.5.)

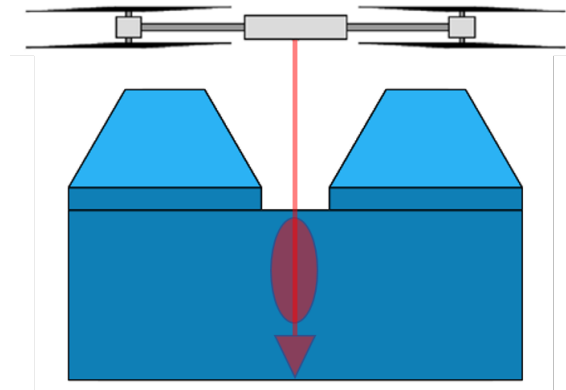


FIGURE 3.5 – Système de levage à l'aide d'une membrane gonflante et d'un harpon de guidage

3.4.2 Avantages

Système utilisable avec tout type de bloc :

L'avantage principal du levage par membrane gonflante est qu'il est adaptable à tout type de blocs pour peu qu'ils soient creux.

Efficacité de la préhension et de la pose :

Le second avantage est la simplicité et l'efficacité de préhension et de pose. En effet, dès le gonflage à pression suffisante de la membrane, le bloc est prêt à être emmené tandis qu'au moindre dégonflage celui-ci est prêt à être libéré. Ceci pourrait, en cas de fuite, éventuellement poser problème.

Poids et encombrement :

Enfin, le dernier avantage de cette technique de levage est le poids réduit que représente une membrane gonflable ainsi que l'absence d'encombrement latéral.

3.4.3 Inconvénients

Cette technique de levage a pour inconvénient de n'être pas facilement implémentable. En effet, il est nécessaire de développer un moyen de gonfler la membrane lorsqu'elle saisit le bloc. Si ce système de compresseur doit être intégré au système de levage fixé au drone alors nous nous retrouvons avec un système dont le poids et la consommation énergétique sont rédhibitoires.

Il faudrait donc être en mesure de gonfler la membrane depuis un compresseur restant au sol. Ce système est possible, si l'embout du compresseur venant s'attacher à la membrane se déplace chaque fois qu'un nouveau bloc doit être soulevé. Pour assurer que la connexion se fasse bien entre la membrane et l'embout, celui-ci devrait également être équipé d'un système de guide. Il va sans dire que le coût et la complexité d'un tel système est elle aussi rédhibitoire.

3.4.4 Récapitulatif

Le tableau 3.3 reprend les différents critères et, selon que la case correspondante soit rouge ou verte, indique si la méthode y répond favorablement ou non.

Critère	
Préhension facile	✓
Pose facile	✓
Reprise des imprécisions	✓
Poids	✓
Encombrement	✓
Coût	✗
Nécessité d'adapter le bloc	✓

Tableau 3.3 – Tableau récapitulatif des avantages et inconvénients du système de préhension par membrane gonflante

3.5 Conclusion

3.5.1 Meilleur choix

Le tableau 3.4 reprend les différents systèmes de levage présentés ainsi que leurs forces et faiblesses.

Critère	Aimants	Pinces	Membrane
Préhension facile	✓	✓	✓
Pose facile	✓	✗	✓
Reprise des imprécisions	✓	✗	✓
Poids	✓	✗	✓
Encombrement	✓	✗	✓
Coût	✓	✓	✗
Nécessité d'adapter le bloc	✗	✓	✓

Tableau 3.4 – Tableau récapitulatif des avantages et inconvénients des différents systèmes de levage

L'analyse du tableau 3.4 mène à la conclusion que le système de levage par membrane gonflante et par aimants électropermanents sont les systèmes les plus adaptés. La complexité et le coût du système de membrane gonflante sont cependant rédhibitoires, comme expliqué dans la section 3.4.3.

Le candidat de choix est donc le système de levage par aimants électropermanents, selon les critères précédemment établis. Ce choix avait déjà été fait dans le cadre des expérimentations réalisées en laboratoire et dont les conclusions sont le sujet du chapitre 6.

3.5.2 Étude de prix de l'inclusion du système d'électroaimants aux blocs

L'acier nécessaire à l'utilisation du système d'électroaimants consiste en :

- 2 plaques d'acier dont les dimensions sont : 0.05m x 0.05m x 0.003m ;
- 2 morceaux de 4 centimètres provenant de barre à béton de 10 millimètres de diamètre servant d'ancres aux plaques d'acier.

Le tableau 3.5 reprend le reste des composants du béton léger développé ainsi que leur prix. La composition du béton léger sera détaillée dans le chapitre 4.

Composant	Masse [kg]	Prix/kg [€/kg]	Total [€]
Ciment	5.4	0.23	1.25
Eau	4	0.005	0.02
Argex	3	0.69	2.07
Argex concassé	4.8	0.69	3.31
Composant	Volume [L]	Prix/L [€/L]	Total [€]
Aérateur	0.012	6.99	0.09
Accélérateur	0.024	7.35	0.18
Composant	Quantité [m ou m ²]	Prix/Quantité [€/(m ou m ²)]	Total [€]
Barre à béton	0.08	0.46	0.04
Plaque métallique	0.005	100	0.5
Total			7.4

Tableau 3.5 – Prix des composants de la Drick LP

La somme des prix des composants d'une Drick LP donne un total de 6.92 € dont ¹ 7.25% sont dû aux éléments nécessaires au système de levage.

Nous pouvons dès lors en conclure que l'ajout des éléments en acier engendre une augmentation de prix qui représente moins de 8% du prix du bloc et peut donc être considéré comme une option viable. Cette augmentation de prix par rapport aux blocs classiques est compensée par le moindre coût de la main-d'oeuvre, comme l'indique C. Coppieters.[9] Notons cependant que les prix indiqués sont les prix des matériaux tels qu'ils ont été payés lors de l'élaboration de ce travail. Ceux-ci n'ont pas été achetés "en gros" et il est donc possible de réduire leurs coûts via des commandes conséquentes. C'est ainsi que l'on peut arriver à des prix plus conventionnels tournant autour des 2 € par bloc.

1. Prix pris sur www.leboutte.be/

Chapitre 4

Réalisation des moules et des blocs

Résumé

L'objectif de ce chapitre est de détailler les étapes ayant mené à la création des Dricks LP et des moules qui ont été utilisés pour ce faire. Ce chapitre représente un investissement considérable en temps, étant donné qu'il consiste essentiellement en essais, erreurs et ingéniosité. Le niveau de détail dans lequel nous entrons a pour but de faire bénéficier quiconque cherche à construire des Dricks LP des expériences acquises lors de ces derniers mois de développement. Enfin, le lecteur en quête d'informations supplémentaires trouvera en Annexes A.4 et A.5 le détail des différentes compositions testées et tests réalisés.

4.1 Composition du béton

Rappelons tout d'abord quelles sont les caractéristiques clés que nous cherchons à obtenir en travaillant sur les compositions de béton :

- un béton d'une densité moindre pour obtenir les blocs les plus légers possible ;
- une surface lisse pour assurer un bon glissement des blocs les uns sur les autres ;
- Garantir une résistance minimale de la part des blocs.

Pour ce faire, nous avons décidé de nous baser sur les travaux préalablement réalisés par A. Naveau et A. Moncourrier [10] ainsi que les travaux de S. Goessens réalisés lors de l'été 2016.

4.1.1 Composants utilisés

Antigel :

L'Antigel présente des avantages et inconvénients identiques aux plastifiants et super-plastifiants. En plus de ces caractéristiques, il permet également d'éviter, comme son nom l'indique, un gel de l'eau présente dans le béton en cas de séchage en période de gel.

Argex et Argex concassé :

L'objectif derrière l'utilisation d'Argex et d'Argex concassé est double. Nous souhaitons à la fois remplacer les graviers et le sable présents dans la composition classique du béton afin d'obtenir un mélange de densité plus faible.

L'Argex se présente en billes d'argile d'environ 1 cm de diamètre. Le broyage a quant à lui été réalisé au LEMSC à l'aide d'une concasseuse. Celle-ci est réglée à un niveau de 5 sur les 10 niveaux d'ouverture possible. Malheureusement, la taille de l'ouverture correspondant aux différents niveaux n'est pas disponible. Cependant, A. Naveau et A. Moncourrier ont réalisé en 2016 les courbes PSD de l'Argex concassé selon le niveau d'ouverture.[10] (Figure 4.1.) Forts des conclusions qu'ils ont pu tirer sur l'ouverture optimale à choisir, nous avons continué dans la même lignée et sélectionné une ouverture de 5 sur les 10 niveaux possibles.

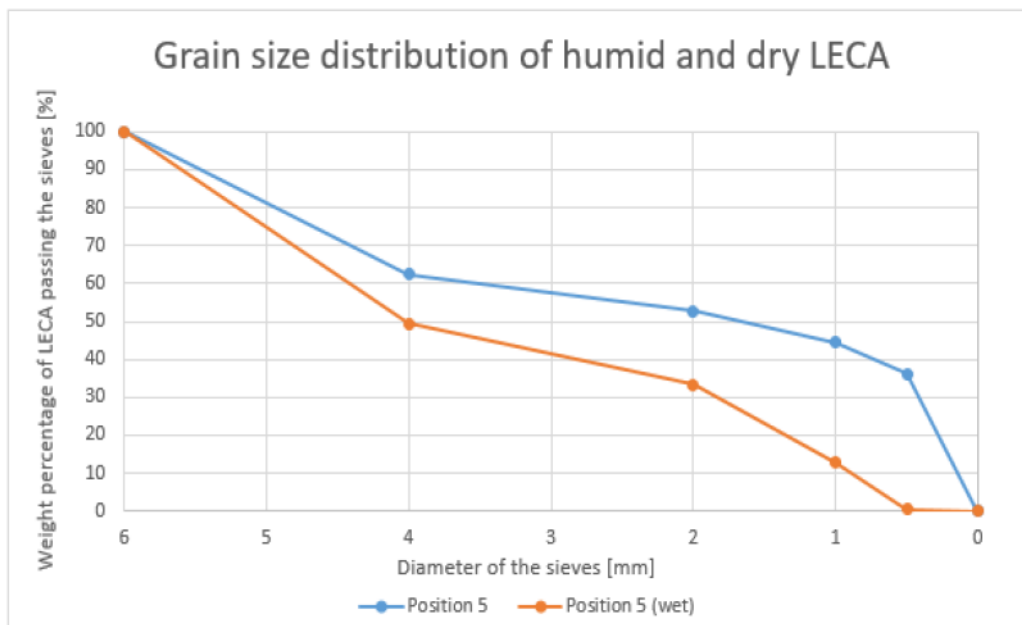


FIGURE 4.1 – Particle Size Distribution de l'Argex concassé pour une ouverture de 6cm [10]

Notons que, à l'instar des billes de polystyrène, les billes d'Argex sont incompatibles avec un béton liquide. Celles-ci vont en effet remonter à la surface du béton et donner un mélange hétérogène. La notion de mélange trop liquide est, malheureusement, délicate à définir. Celle-ci dépend en effet du bon mélange des éléments constitutifs du béton qui peut, parfois, être difficile à réaliser en laboratoire. Nous avons cependant réalisé plusieurs tests dont les conclusions sont disponibles en section 4.5.

Ciment :

Le ciment utilisé lors de la réalisation des blocs est du Ciment Portland 32.5 N'. Nous pouvons regretter ce choix dans la mesure où il ne permet pas d'obtenir des blocs, comme nous en discuterons plus loin, d'une résistance suffisante.

Entraîneur d'air : Sika® Airmix :

Objectif	Risque
Réduire la densité du béton en augmentant sa teneur en air	Perte de résistance Dégradation de l'état de surface

Tableau 4.1 – Caractéristiques de l'entraîneur d'air

La présence de bulles d'air peut altérer l'état de surface si l'additif est utilisé en trop grande quantité. L'entraîneur d'air peut également occasionner une diminution de résistance et, dès lors, contrer les bénéfices apportés par l'utilisation de plastifiants. Notons que l'émulsion produite par l'utilisation de l'entraîneur d'air peut être utilisée pour améliorer l'état de surface de la pièce en l'incorporant au mélange.

Plastifiants et super-plastifiants : Sika® BV 3M & Sika® ViscoCrete® 20 Gold :

Objectif	Risque
Réduire la teneur en eau du mélange : - Accélérer la prise - Augmenter la résistance Fluidifier le béton : - Faciliter sa mise en oeuvre	Prise prématurée lors du coulage

Tableau 4.2 – Caractéristiques des plastifiants et super-plastifiants

Une diminution de la teneur en eau permet un séchage plus rapide ainsi qu'une diminution des pores résultant de l'évaporation de l'eau. Ces pores contribuent en outre à une diminution de la résistance du béton. Les plastifiants et super plastifiants permettent également de faciliter la mise en oeuvre du béton en le rendant plus fluide.

Polystyrène expansé :

Objectif	Risque
Réduire la densité du béton	Pertes de résistance Dégradation de l'état de surface Obtention d'un béton hétérogène

Tableau 4.3 – Caractéristiques du polystyrène expansé

Comme suggéré par les compositions développées par les travaux sus-cités, des billes de polystyrène expansé ont été dans un premier temps incorporées aux compositions de béton testées. Ces billes de 4 mm de diamètre ont pour objectif de remplacer les particules de diamètres similaires dans le béton. Leur densité moindre mène alors à un béton plus léger. Elles peuvent cependant mener à un béton très hétérogène si celui-ci est relativement liquide. En effet, les billes flottent et remontent alors à la surface du béton, résultant en un état de surface non suffisant pour permettre un glissement et un béton hétérogène.



FIGURE 4.2 – État de surface insuffisant dû aux billes de polystyrène qui remontent à la surface.

4.1.2 Compositions de base

Après de multiples essais, nous arrivons à la conclusion que la composition suivante présente une base correcte à partir de laquelle il est possible de respecter les contraintes de poids et d'état de surface. Les quantités mentionnées permettent de couler une Drick LP ainsi qu'un cube de 20 centimètres de côté. Notons que le Drick LP présente un volume de $0,01 \text{ m}^3$:

Ingrédient	Poids [kg]	Volume [L]	Remarque
Ciment C32.5	9		
Eau	4		
Argex	5		
Argex concassé	8		
Polystyrène expansé		0	
Aérateur		0.02	
Accélérateur		0.02	

Tableau 4.4 – Composition de base pour une Drick LP et un cube $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$

En effet, nous obtenons une densité d'environ $1500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, soit un bloc d'environ 15 kg, et un état de surface correct (figure 4.3). Insistons sur le fait que cette composition est une base et peut être adaptée en fonction, par exemple, du drone employé. Un drone permettant de soulever aisément des charges plus lourdes peut transporter des éléments dont la composition comporte plus de particules fines et ont dès lors un meilleur état de surface et une plus grande résistance.

4.2 Réalisation du moule par impression 3D

4.2.1 Méthodologie

Le moule permettant de couler les Dricks LP est constitué de 4 éléments distincts (figure 4.4) fixés entre eux à l'aide d'attaches et de cales assurant leur bon positionnement :

1. La partie supérieure, imprimée en 3D, négatif des pyramides supérieures.
2. Les éléments composant les côtés du moule, en bois de coffrage.
3. La partie inférieure, imprimée en 3D, négatif des pyramides inférieures.
4. La partie intérieure du moule, permettant d'assurer que les blocs soient creux, réalisée en bois de coffrage.



FIGURE 4.3 – État de surface obtenu relativement correct



FIGURE 4.4 – Moule utilisé pour réaliser les Dricks LP

Les parties imprimées en 3D sont développées à l'aide de *SolidWorks*[®] et de son outil "Coque". Une fois la coque réalisée, elle est agrandie de façon à être aux bonnes dimensions pour pouvoir se reposer sur les parties en bois du moule et permettre l'utilisation d'un système de fixations.

Notons que le sens dans lequel le moule s'ouvre n'est pas anodin. En effet, étant donné que l'on peut anticiper le fait que les surfaces de moindre qualité seront situées au niveau de l'ouverture à cause de la gravité oeuvrant vers le bas, nous avons choisi de les positionner là où ces surfaces auront le moins d'impact sur le bon fonctionnement de notre bloc : sur une partie latérale. En effet, les surfaces verticales moins lisses ne servent pas, sauf dans le cas de deux blocs placés parallèlement ce qui n'est pas supposé arriver. Quant aux deux faces des pyramides qui seront moins lisses, étant donné qu'elles ne servent que dans un seul cas de mauvais positionnement du drone, leur impact est limité. Une solution de traitement de surface peut cependant être envisagée à l'avenir. Enfin, une ouverture plus grande nous offre également un plus grand contrôle lors du coulage, ainsi que plus de place pour le vibrage.

1 - Partie supérieure :

La partie supérieure, imprimée en 2 parties du fait de sa grande taille et des limites imposées par l'imprimante utilisée, est composée de deux pièces s'emboîtant l'une dans l'autre. Du fait de la forme de la pièce, les encoches ne peuvent pas être placées de façon à fixer les deux parties de la pièce dans deux des trois directions de l'espace.

Une fois les pièces emboîtées, des éléments en bois ont été utilisés pour rigidifier et solidariser les deux parties de la pièce.

2 - Partie en bois :

La partie du milieu est quant à elle composée de 4 éléments en bois faisant 42 et 22 centimètres de long, pour 15 centimètres de haut. Ceux-ci sont fixés entre eux à l'aide de vis.

3 - Partie inférieure :

La partie inférieure est, à l'instar de la partie supérieure, imprimée en deux parties du fait de sa taille. Les deux parties s'emboîtent et permettent de fixer les pièces horizontalement et verticalement grâce aux encoches placées sur les montants des pyramides.

L'expérience nous montre que cette partie du moule est celle qui a été le plus malmenée lors des opérations de moulage et démoulage. En effet, nous avons plusieurs fois constaté des fissures et des décollements de certaines parties de la pièce.

4 - Partie intérieure :

La partie intérieure est faite de 4 éléments en bois placés au coeur du moule, faisant ainsi en sorte que les blocs soient creux. Il est important de prévoir un système permettant d'extraire cette pièce avec facilité. En effet, l'utilisation de la force dans une telle zone peut entraîner des dégâts aux pyramides qui, lorsque le béton est encore frais, sont fragiles.

4.2.2 Problèmes rencontrés

L'objectif de cette section est de sensibiliser le lecteur aux problèmes rencontrés lors du développement des Dricks LP. En effet, les auteurs souhaitent que les personnes qui poursuivront éventuellement le développement d'éléments drone-compatibles en béton puissent profiter d'un document où ils retrouveront les choses à faire, et à ne pas faire. Les problèmes rencontrés sont majoritairement dus à la nature fragile des matériaux utilisés, le PLA et le PolyMax PLA.

Difficulté de réaliser une pièce centrale aux bonnes dimensions et conique :

La pièce centrale, réalisée en bois, est à priori un simple parallélépipède rectangle. Cependant, pour un démoulage plus aisé, il apparut vite indispensable qu'il soit conique.

Garantir la conicité d'une pièce réalisée en bois à l'aide d'une scie classique n'est pas chose aisée, c'est pourquoi nous recommandons le recours à des méthodes automatisées. Notons également que cette partie du moule ne présente pas, contrairement à ce que l'on pourrait penser, de préposition à être imprimée en 3D. En effet, bien que la conicité puisse être garantie grâce à l'impression 3D, la nature fragile des matériaux utilisés lors de ce processus le rend incompatible pour cette utilisation qui nécessite de parfois utiliser la force pour le dégager du béton. La pièce étant en contact sur tout son pourtour avec le béton qui fait pression sur elle, elle mobilise énormément de frottement ce qui peut la rendre difficile à déloger. La nécessité d'utiliser la force pourrait s'avérer fatal pour une pièce imprimée en 3D.

Une solution pourrait être de réaliser cette pièce en acier. Ou encore de l'imprimer en 3D mais de la renforcer à posteriori.

Notons qu'avant d'arriver à ces conclusions, nous avons exploré la possibilité de démonter la pièce lors de chaque démoulage. Cette piste fut exploitée tant que nous nous autorisions à ne pas utiliser de pièce centrale conique. Dans le cadre du projet de collaboration avec l'IFSB¹ ces derniers ont demandé que, en vue d'une production industrielle, la partie centrale du moule soit conique. Nous avons dès lors tenté de développer des moules ayant une partie centrale conique.

Fragilité du moule :

Les parties supérieure et inférieure, imprimées en 3D, résistent mal aux opérations de moulage et démoulage. Particulièrement la pièce inférieure. Celle-ci ayant une surface de contact plus importante, il est naturel que le béton y adhère plus. Lors de l'opération de démoulage, il est parfois nécessaire d'utiliser des outils comme levier pour décoller le béton du moule. Cette manipulation occasionne de gros dégâts au moule, comme l'illustre la figure 4.5.

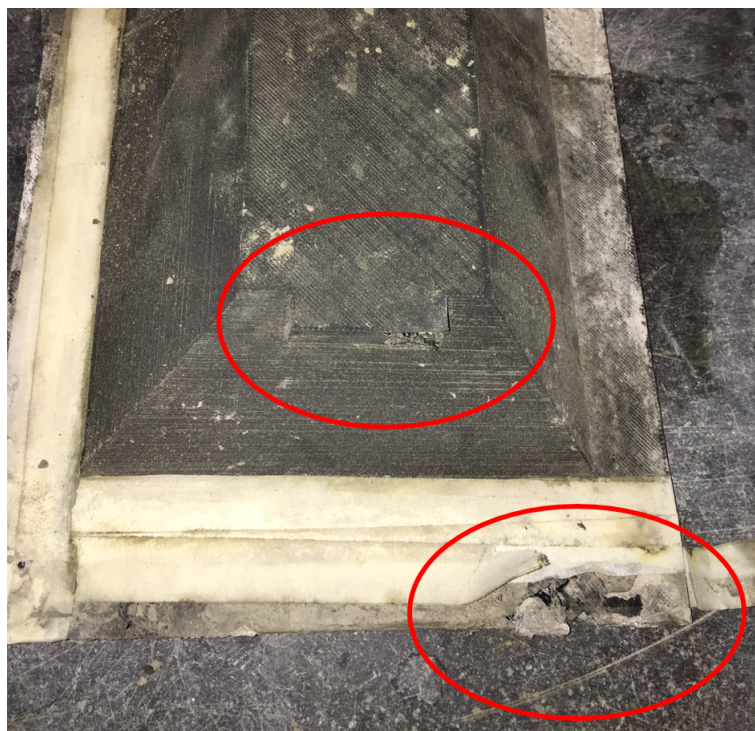


FIGURE 4.5 – Moule avec parties déchiquetées, décollées et cassées après 4 utilisations

1. Institut de Formation Sectoriel du Bâtiment au Luxembourg

L'utilisation de vis est un autre facteur entraînant une usure prématurée des moules. Ceux-ci, malgré la présence de pré-trous, vivent très mal les cycles vissage-dévisage et finissent par se déchiqueter aux endroits concernés.

Notons que nous soupçonnons que certains agents chimiques utilisés puissent menacer l'intégrité du moule fait en PLA. En effet, nous avons constaté des dégradations à des endroits ne reprenant pas d'efforts particuliers.

Deux solutions ont été trouvées pour remédier à ces problèmes : l'utilisation de planches renforçant les moules, collées à ceux-ci, équipées d'attaches type "boîte à outils". Les attaches permettent d'éviter le recours à des vis, et les planches, plus rigides que nos impressions, permettent d'éviter une flexion du moule lors du démoulage. (Figure 4.6.)

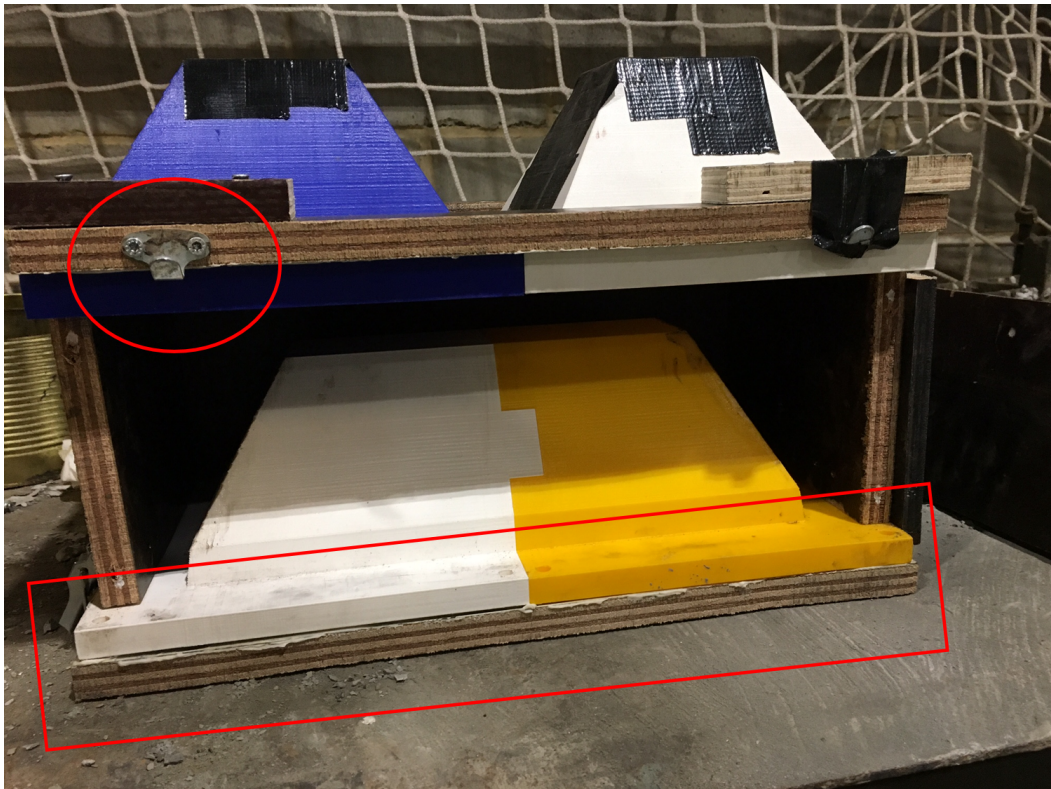


FIGURE 4.6 – Moule équipé d'attaches type "boîte à outils" et de planches de renforcement

Difficulté de démoulage :

La surface des parties du moule où du matériau de support a été utilisé lors de l'impression est assez rugueuse. Cela entraîne une grande adhérence entre le béton et le moule et un démoulage parfois difficile. Pour remédier à ce problème, nous avons recours à du silicone pour lisser la surface du moule, ou encore à du ruban adhésif qui est moins adhérent au béton.

En outre, des difficultés à retirer la pièce centrale, emprisonnée dans le béton, se sont faites ressentir comme expliqué précédemment.

4.3 Moulage et démoulage des blocs

Nous décrivons ici les opérations de moulage et démoulage dans l'ordre de réalisation des opérations.

4.3.1 Préparation du moule

Avant toute utilisation le moule doit être préparé :

- les surfaces du moule doivent être convenablement huilées.
- les plats métalliques servant à la préhension du bloc ; doivent être collés au moule ; (Figure 4.7.)
- le moule doit être monté et les attaches bien fermées.



FIGURE 4.7 – Plat métallique équipé de pâte collante destiné à être collé au moule

4.3.2 Coulage du béton



FIGURE 4.8 – Vibrage du béton à la tige. Les billes d'Argex remontent et si aucun contrôle n'est fait, entraînent un mauvais état de surface

Lors du coulage du béton il est primordial de faire attention à vibrer le béton avec parcimonie. En effet, ne pas le vibrer mène à un mauvais remplissage des zones présentant des angles mais un vibrage trop important entraîne une remontée des éléments légers et produit un béton hétérogène. Nous veillons donc à couler le béton et à effectuer un vibrage par couches d'environ 5 à 10 centimètres (figure 4.8). Pour réaliser ce vibrage parcimonieux, insistons sur l'importance d'avoir un béton présentant une fluidité acceptable, comme il a été expliqué précédemment.

4.3.3 Retournement du moule

C'est afin d'insister sur l'importance de cette étape que nous lui accordons un point à part entière. En effet, pour obtenir un état de surface suffisant des deux côtés du bloc il est primordial de retourner celui-ci une fois le béton coulé. Lors du coulage, les particules fines composant le mélange descendent et viennent se poser sur les parois du moule résultant ainsi en une surface de très bonne qualité. Ces particules ayant été comprimées contre la face inférieure du moule, elles restent en place une fois le moule retourné et les particules situées de l'autre côté du moule peuvent quant à elles migrer vers les autres parois. La figure 4.8 donne une idée de l'état de surface obtenu si le retournement du moule n'est pas réalisé.

Dans le cadre d'une application industrielle, il serait intéressant de pouvoir mettre les moules sous pression afin d'assurer un fini de surface optimal sur toutes les faces.

4.3.4 Démoulage

Le démoulage est l'étape critique du processus de création des blocs. Il est aisé de casser un bloc en cherchant à le démouler avec trop de vigueur. Malheureusement, il n'est parfois pas possible d'échapper à l'utilisation de la force pour pouvoir extraire les parties du moule du béton.

La partie centrale conique permet, théoriquement, d'être démoulée aisément. Comme discuté précédemment, elle peut poser problème et doit être extraite à coups de marteau.

La partie inférieure imprimée en 3D (voir figure 4.4) peut également poser problème. Nous constatons lors d'essais que la lisse à l'aide d'une couche fine de silicone permet un démoulage bien plus aisé. En effet, le silicone tend à s'accrocher au béton et à se décoller de la surface du moule, le laissant ainsi intact. Ce phénomène est illustré à la figure 4.9



FIGURE 4.9 – Moule dont les pentes étaient initialement couvertes de silicone

Notons qu'après utilisation d'un silicone différent, nous ne constatons pas l'apparition de ce phénomène. Il semble que certains empêchent l'adhérence du moule au béton en se décollant du moule tandis que d'autres n'adhèrent pas au béton. L'utilisation de silicone fut également faite pour arrondir les arêtes inférieures des blocs, comme il a été expliqué dans le chapitre 2

4.4 Essais de compression

4.4.1 Dispositif

De façon à ce que les tests de compression effectués sur les Dricks LP soient fidèles à la réalité et à la façon dont les efforts sont transmis de bloc en bloc, des négatifs des blocs, représentant les blocs inférieurs et supérieurs, ont du être mis au point.

Afin d'assurer que la rupture du système ait bien lieu dans la Dricks LP et non pas dans l'un des négatifs, ceux-ci sont constitués exclusivement de ciment. En effet, un bloc n'étant aussi solide que le plus fragile de ses composants, nous choisissons cette solution pour assurer que le test des blocs soit fait de façon correcte.

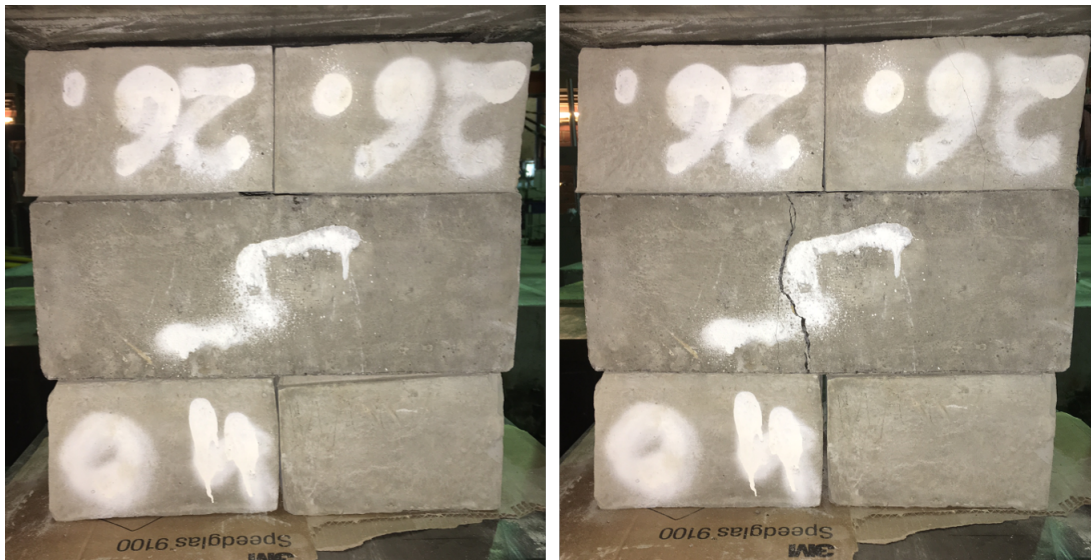


FIGURE 4.10 – Dispositif d'essai des Dricks LP

Comme la figure 4.10 l'illustre, la rupture a bien lieu dans la Drick LP et non dans les négatifs permettant le chargement.

4.4.2 Résultats

Cubes :



FIGURE 4.11 – Dispositif d'essai des cubes de béton

La figure 4.12 illustre la progression de la résistance du béton dont la composition est décrite dans le tableau 4.4

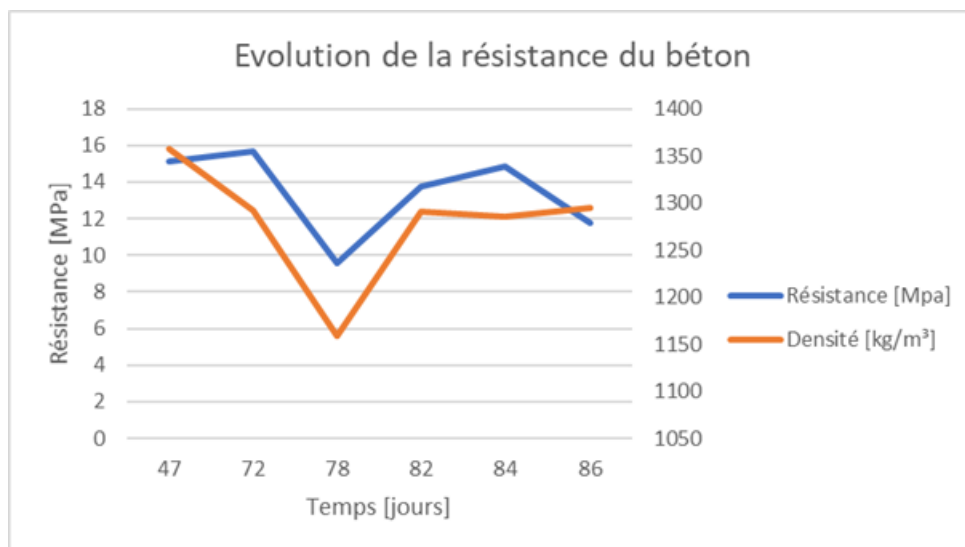


FIGURE 4.12 – Courbe de chargement du béton léger

Rappelons que ces résultats doivent être pris pour ce qu'ils sont. Ils donnent un ordre de grandeur de la résistance à laquelle on peut s'attendre de la part du béton léger développé en laboratoire. Pour qu'une valeur plus précise et sécuritaire puisse-t-être dégagée, il est nécessaire d'effectuer les essais sur un échantillon de cubes plus important et en prendre le fractile 5%. De plus, des tests de résistance aux chargements de longue durée devraient, normalement, être conduits.

Une moyenne des résistances obtenues nous donne une valeur de 13.46 MPa. Cette valeur de résistance moyenne sur cube à plus de 28 jours est plus faible que celle d'un béton de classe C12 qui est de 20 MPa. Il va sans dire qu'il est nécessaire d'améliorer la résistance d'un tel béton. Les solutions évidentes qui se présentent et peuvent être poursuivies à l'avenir sont l'utilisation d'un ciment d'une classe de résistance plus élevée, ainsi que l'utilisation d'une alternative aux

billes d'Argex. En effet, le poids des blocs est, dans l'état actuel des choses, assez léger que pour permettre une marge de manoeuvre sur le choix des matériaux et la rupture du bloc ayant lieu à travers les billes d'Argex, celles-ci représentent un point faible de la composition.

Dricks LP :

Avant toute chose, notons que les résultats des essais effectués sur les Dricks LP sont à prendre avec encore plus de précautions que les essais sur les cubes. En effet, l'échantillon de Dricks LP étant très réduit, il n'était pas possible d'effectuer une campagne d'essais de plus de 3 blocs.

Face à la précision aléatoire du dispositif de chargement des Dricks LP (figure 4.10) il est difficile de définir précisément quelles surfaces sont en contact lors de l'essai et ainsi définir une contrainte. Afin de palier ce problème, et de pouvoir comparer les Dricks LP avec des blocs conventionnels, nous allons utiliser la surface de l'empreinte au sol du bloc comme référence. Dès lors, il sera possible de comparer la valeur trouvée avec des résistances moyennes typiques de blocs conventionnels.

Les essais effectués sur les Dricks LP nous ont donné une résistance moyenne de $0.25 \frac{N}{mm^2_{horizontal}}$ pour des Dricks LP **creux**. Les essais sur les Dricks LP **pleins** n'ont pas été concluants. En effet, les imprécisions du dispositif de mise en charge sont telles que le bloc, chargé non symétriquement, a cassé dans l'une des pyramides. Les résultats sont donc non exploitables. Enfin, les valeurs obtenues sont à comparer avec les résistances des blocs de maçonnerie conventionnels². Les résistances moyennes de ces blocs ont un ordre de grandeur de $10 \frac{N}{mm^2}$.

Notons finalement que préalablement au coulage du béton dans les creux des Dricks LP, il est possible d'y insérer des armatures. Nous pouvons dès lors obtenir un système hybride à l'instar des blocs STEPOC [17] illustrés sur la figure 4.13.



FIGURE 4.13 – Blocs armés Stepoc remplis de béton frais [17]

2. Calculé à l'aide du catalogue <http://www.coeck.be/fr/producten/bouw/>

4.5 Essai d'affaissement au cône d'Abrams



FIGURE 4.14 – Résultat de l'essai d'étalement à la table à choc

4.6 Autres pistes

Afin de réaliser des blocs légers, d'autres possibilités qu'une composition de béton intégrant de l'argile existent. Parcourons ici quelques autres solutions notables et expliquons pourquoi elles n'ont pas été poursuivies.

4.6.1 Ytong™

L'Ytong™ est un matériau de construction léger, un béton cellulaire, fabriqué à l'aide de chaux, de ciment, de sable et de bulles d'air. [18] Sa mise en oeuvre présente des similitudes avec les principes utilisés dans le développement d'un système drone-compatible : l'utilisation d'un système de tenons et mortaises illustré à la figure 4.15.

L'Ytong présente en outre des propriétés remarquables en termes d'isolation thermique avec un coefficient de transmission thermique de $U = 0.16 \frac{W}{m^2K}$ pour un bloc de 42.5 centimètres de large.

Problèmes potentiels :

Les problèmes majeurs de l'Ytong qui empêchent son utilisation dans le cadre de ce projet tiennent en 2 points :

1. la fragilité des blocs
2. leur processus de fabrication

Les blocs sont très fragiles, notamment au niveau des angles. En effet, une poignée de main trop ferme suffit, lors de la visite réalisée en octobre 2016, à briser les coins d'un linteau. Les



FIGURE 4.15 – Bloc Ytong [19]

Dricks étant amenés à être transportés et déplacés par drone, des coups sont à prévoir dus à la précision de la méthode. Il ne semble pas concevable d'accepter le risque qu'un bloc se casse lors de chaque mise en place. Ce défaut pourrait cependant être compensé par l'amélioration du positionnement du drone dans le futur.

Vient ensuite le second problème des blocs Ytong, la façon dont ils sont produits. De grandes pièces d'Ytong sont produites dans des fours de très grands volumes et ensuite découpées à l'aide de scies à bande. D'après les représentants de la marque présents lors de la visite, les blocs ne peuvent pas être moulés dans des formes plus exotiques et la technique de découpe à la scie ne permet également pas l'élaboration de formes plus alambiquées. Ces formes étant primordiales pour la reprise d'imprécision, ce matériau est à écarter.

Notons que, malheureusement, les recettes des blocs Ytong étant secrètes ainsi que la nécessité de cuire les blocs ont rendu impossible une éventuelle reproduction en laboratoire.

Inspirations à prendre :

Ce qui est à retenir de la visite Ytong est la solution choisie pour réaliser des éléments longs. Ceux-ci consistent en un U en Ytong dans lequel des armatures sont placées. Le U est ensuite rempli de béton. (Figure 4.16.)

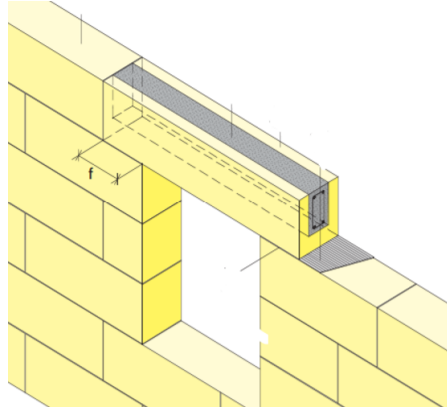


FIGURE 4.16 – Élément long en Ytong [20]

Ce système d'éléments longs et légers peut être adapté aux Dricks LP Lintle (LPL) et permettre le transport d'éléments longs par drone qui, à posteriori, seraient remplis de béton.

4.6.2 Béton fibré**Principe :**

Le principe du béton fibré consiste à remplacer les armatures de traction par des fibres, métalliques ou non. Le réseau de fibres, pour peu qu'elles soient distribuées de façon homogène dans la matrice de béton, permet alors de renforcer le béton dans toutes les directions en traction et en compression. (Figure 4.17.)



FIGURE 4.17 – Béton fibré [21]

Ce type de béton est essentiellement utilisé dans des applications où les efforts de traction ne requièrent pas un dimensionnement particulier telles que les dalles de sol.

Avantages :

L'intérêt principal du béton fibré pour la construction par drone réside dans la relative facilité avec laquelle il est possible d'augmenter la résistance d'un béton tout en ayant un contrôle sur son poids. En effet, augmenter la densité en fibres permet de garantir une augmentation de résistance tout en ayant la possibilité d'exercer un contrôle strict sur le poids volumique du béton.

4.6.3 Argex Pompmix S

L'Argex Pompmix S, dont la fiche technique est disponible en Annexe A.3, est un béton pompable, autoplaçant, dont la composition est très proche de celles développées au cours de ce travail. C'est un béton léger, pompable, résistant et autoplaçant vers lequel il pourrait être intéressant de se diriger dans le cadre d'une éventuelle production industrielle des Dricks LP.

Chapitre 5

Impression 3D

Résumé

L'objectif de ce chapitre est de partager l'expérience acquise lors du développement des quatre moules imprimés en 3D. Les paramètres et techniques choisies, expliquées brièvement dans les chapitres précédents, y seront détaillés.

5.1 Choix du matériau et de l'imprimante

5.1.1 Les matériaux disponibles

Démarrons tout d'abord par un récapitulatif des différents matériaux couramment utilisés lors d'impression 3D par dépôt de fil en fusion (FDM), technique utilisée dans notre cas. (Tableau 5.1.) Cette technique consiste en l'extrusion d'un matériau thermoplastique, un matériau dont la température de mise en forme n'a pas d'influence sur ses propriétés. Un robot déplace l'extrudeuse dans un plan XY, tandis que la table d'impression se charge de descendre lorsque la couche à imprimer est terminée. [1] (Figure 5.1.)

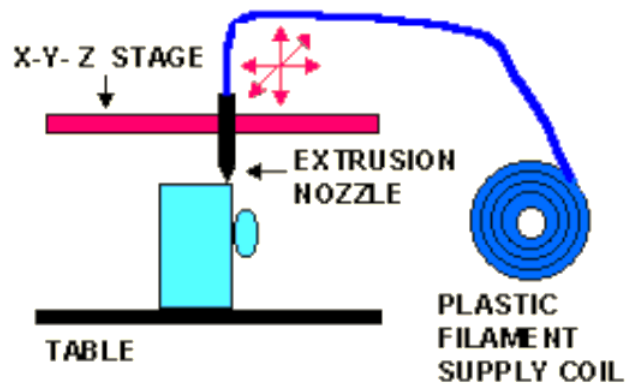


FIGURE 5.1 – Principe de la technique d'impression par dépôt de fil en fusion [22]

D'autres techniques de fabrication additive telles que le frittage ou la stéréolithographie existent et permettent d'obtenir, dans certaines conditions, de meilleurs résultats. Celles-ci n'ont cependant pas été utilisées dans le cadre de ce mémoire. En effet, bien que certaines imprimantes puissent imprimer un grand nombre de matériaux, afin d'obtenir des résultats optimaux il est intéressant d'utiliser une imprimante spécialisée. [22] [23] Les fiches techniques des différents matériaux fournis par Ultimaker sont disponibles en Annexe. [24]

Matériau	Avantages	Inconvénients
ABS	Excellentes propriétés mécaniques	Imprimante couteuse
Nylon	Propriétés mécaniques, faible friction	Point de fusion faible (80°C)
PC	Résistance à la fatigue	
PLA	Mise en oeuvre	Fragile
PolyMax PLA	Plus ductile que PLA	Mise en oeuvre
PVA	Soluble : moules perdus	Soluble
TPU	Flexible, ductile, inerte	Sensible aux UV et à l'humidité

Tableau 5.1 – Description des matériaux utilisés en impression 3D

Notons que, notamment, le cône utilisé par S. Goessens et P. Latteur comme guide lors des essais de colonnes grecques a été imprimé en ABS à l'aide d'une imprimante Fortus 250 MC.

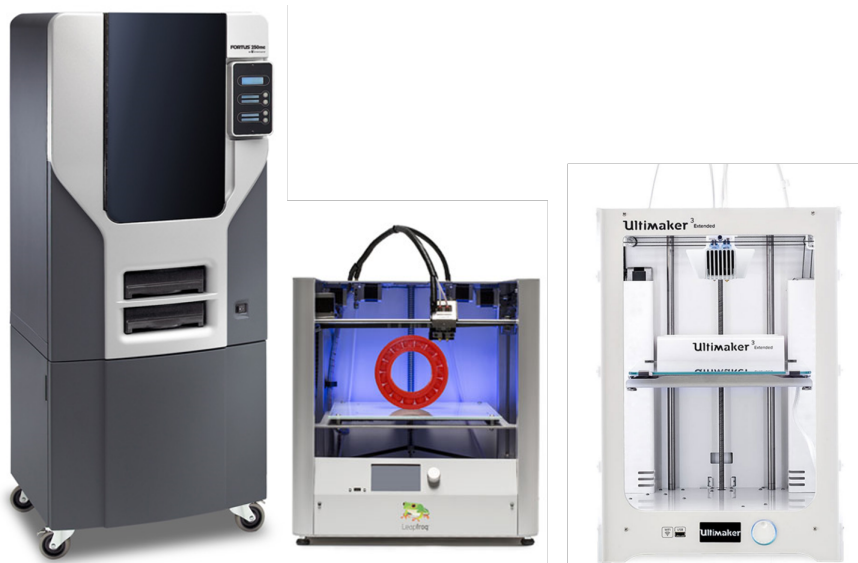


FIGURE 5.2 – Imprimantes disponibles à l'Université catholique de Louvain : Fortus 250 MC [25] - LeapFrog Creatr HS [26] - Ultimaker 3 Extended [27]

5.1.2 Les imprimantes disponibles

Les machines mises à notre disposition pour la réalisation des différentes pièces sont, dans un premier temps, une LeapFrog Creatr HS et, une fois acquise par le pôle GC de l'UCL, une Ultimaker 3 Extended (figure 5.2). Les volumes imprimables de ces imprimantes (tableau 5.2) étant insuffisants pour pouvoir imprimer les moules d'une seule pièce, ceux-ci ont dû être divisés en deux pièces plus petites.

La LeapFrog Creatr HS permet d'imprimer à l'aide de PolyMax PLA et de PLA, principalement. L'Ultimaker 3, quant à elle, permet l'impression à l'aide PLA et de divers autres matériaux. Cependant, nous ne l'avons testée qu'avec du PLA celui-ci étant le moins coûteux et donc le plus adapté à du prototypage.

Imprimante	Dimension [largeur [cm] x profondeur [cm] x hauteur [cm]]
LeapFrog Creatr HS	27 x 28 x 18
Ultimaker 3 Extended	21.5 x 21.5 x 30

Tableau 5.2 – Volumes imprimables des imprimantes 3D mises à disposition par l'EPL

5.1.3 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés ont été le PolyMax PLA et le PLA. En effet, leurs prix abordables ainsi que le fait qu'ils puissent être utilisés sur les imprimantes mises à notre disposition en font des candidats de choix.

Tout d'abord, nous avons utilisé le Polymax PLA car l'imprimante à notre disposition à ce moment-là, la LeapFrog Creatr HS, permettait l'impression à l'aide de ce matériau. Les résultats obtenus, satisfaisants d'un point de vue mécanique et des tolérances géométriques, étaient cependant insatisfaisants du point de vue de l'état de surface. Le développement des moules sur cette imprimante prit un tournant tragique, l'imprimante refusant en effet l'impression de pièces de grande taille et s'arrêtant systématiquement au milieu de l'impression sans crier gare. Malgré de nombreuses tentatives de débogage ainsi que les contacts pris avec le fabricant, nous ne sommes pas parvenus à rendre l'imprimante à nouveau coopérative.

Une fois l'imprimante UltiMaker 3 Extended rendue disponible, nous l'avons utilisé avec du PLA, l'un des matériaux pour lequel l'imprimante présente une configuration de base optimisée et pour lequel le support en ligne est suffisant. Les résultats furent bien plus satisfaisants d'un point de vue de l'état de surface. Cependant, le PLA étant un matériau fragile, les moules ainsi imprimés sont à utiliser avec plus de précautions.

5.1.4 Paramètres utilisés

Le lecteur trouvera dans le tableau 5.3 le récapitulatif des valeurs utilisées pour les paramètres présentés. Les paramètres sur lesquels nous avons trouvé qu'il était important d'insister et sur lesquels nous avons effectué des modifications sont présentés ci-après. Les autres nombreux paramètres qu'il est possible de modifier ont été utilisés avec leurs valeurs par défaut pour une impression rapide.

Jeu entre les pièces imprimées :

Un jeu de 0.2 mm est utilisé pour l'emboîtement des pièces imprimées en 3D entre elles, comme recommandé par B. Herman. [22] et illustré à la figure 5.3

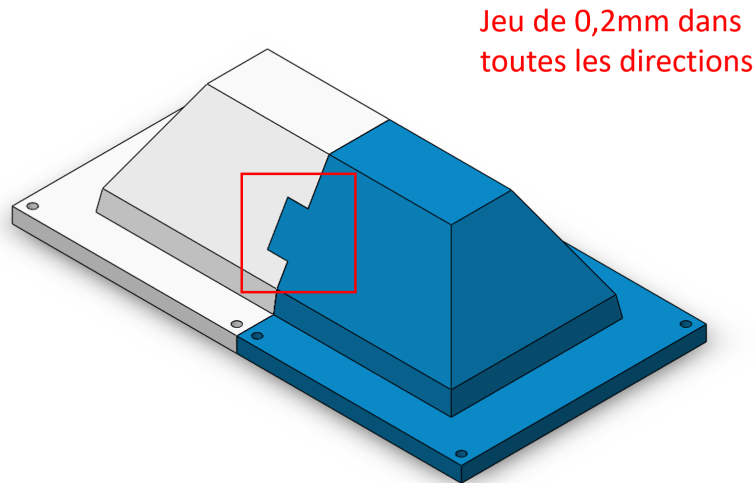


FIGURE 5.3 – Jeu de 0.2 mm entre les pièces imprimées

Largeur de ligne et hauteur de couche :

Le matériau extrudé par l'imprimante et sortant de la buse a une certaine largeur et une certaine épaisseur. Ce sont respectivement la largeur de ligne et la hauteur de couche.

La largeur de ligne doit, en général, correspondre à la largeur de la buse d'extrusion. Cependant, une valeur un peu plus faible peut permettre d'obtenir de meilleurs résultats d'un point de vue fini de surface. Des valeurs trop faibles vont mener à des temps d'impression peu intéressants.

La hauteur de couche, quant à elle, influence la résolution de la pièce imprimée. Des valeurs élevées permettent d'accélérer significativement l'impression des pièces, en sacrifiant l'état de surface.

Ces paramètres deviennent primordiaux lorsque les pièces à imprimer présentent des pentes et que du matériau de support est utilisé. En effet, la résolution est alors primordiale pour obtenir une pièce assez lisse qui permettra au moule de ne pas accrocher au béton.

Nombre de lignes de paroi :

Les lignes de paroi sont les couches déposées par l'extrudeuse au niveau des surfaces extérieures de la pièce. Le centre de celle-ci est quant à lui rempli de matériaux de remplissage selon un motif choisi par l'utilisateur afin de réduire la quantité de matériau utilisé. Les imprimantes utilisées permettent de configurer le nombre de lignes de paroi horizontales et verticales. La figure 5.4, ainsi que la figure 5.5, montrent, entourée en rouge et en rouge et jaune, des exemples de lignes de parois.

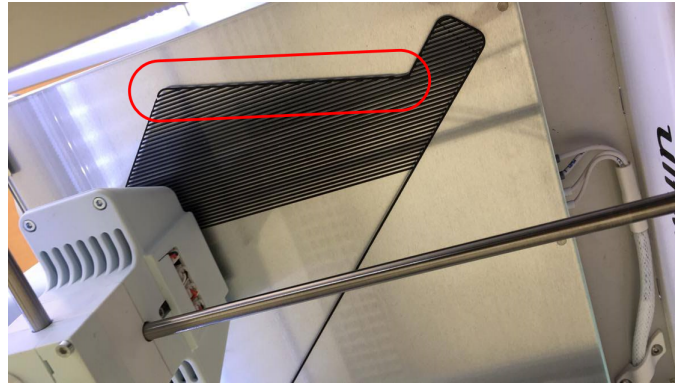


FIGURE 5.4 – Les lignes de parois, dont une est entourée en rouge, sont les lignes composant la surface extérieure du moule

Les lignes de paroi verticales peuvent représenter un problème. En effet, pour chaque couche imprimée une nouvelle ligne de paroi l'est également. Demander à l'imprimante un grand nombre de lignes de paroi peut alors augmenter significativement le temps d'impression et la quantité de matériau utilisé. Un nombre trop faible de lignes de paroi va mener à une surface moins résistante et plus sujette aux décollements. (Comme l'illustre la figure 4.5.)

Taux de remplissage :

Le taux, ou densité, de remplissage représente, comme son nom l'indique, la densité avec laquelle la pièce va être remplie à l'aide d'un motif préalablement choisi. Plus celle-ci est élevée, plus la pièce est dense et solide.

Cependant, pour des pièces de la taille des moules, nous arrivons à des temps d'impression dépassant les 48 heures par pièce pour un taux de remplissage de 15%. Le moule étant composé de 4 pièces imprimées en 3D, un équilibre entre temps d'impression et solidité du moule est délicat à trouver. Enfin, un taux de remplissage trop élevé peut engendrer des pièces trop demandeuses en matériau et pour lesquelles une bobine est insuffisante pour assurer l'ensemble de l'impression.

Matériau de support :

Le matériau de support sert à soutenir et permettre le porte-à-faux. (Figure 5.5.) Le matériau utilisé peut être, entre autres, du PLA. Si l'accès à la zone supportée est réduit, il est également possible d'utiliser du PVA qui, comme indiqué dans le tableau 5.1, est soluble dans l'eau. Étant dans une situation où le matériau de support est facilement accessible, nous avons utilisé le même matériau que la pièce à imprimer : le PLA.

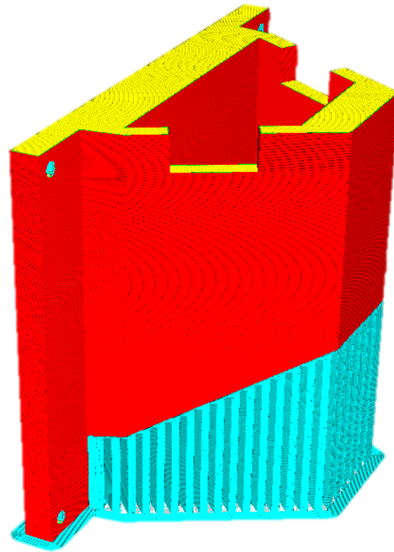


FIGURE 5.5 – Bleu : Matériau de support - Jaune : Lignes de paroi horizontale - Rouge : Lignes de paroi verticale

Le taux de remplissage du matériau de support ainsi que le motif imprimé influent non seulement sur la solidité du support mais également sur la facilité avec laquelle celui-ci peut être décroché de la pièce après impression et sur l'état de surface des faces soutenues. C'est ce dernier point qui peut poser problème comme illustré sur la figure 5.6. Il est dès lors intéressant de poursuivre l'optimisation de la configuration de l'utilisation du matériau de support à l'avenir.

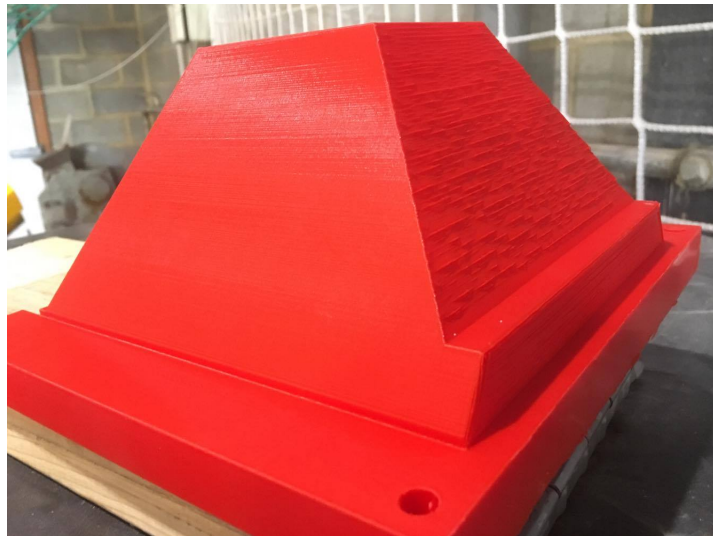


FIGURE 5.6 – La surface en pente soutenue lors de l'impression présente des indentations

Adhérence au plateau :

Les quatre configurations classiques permettant l'adhérence au plateau sont les suivantes :

1. aucun système d'adhérence ;
2. l'utilisation d'une "jupe" ;
3. l'utilisation d'une "bordure" ;
4. l'utilisation d'un "radeau" ;

La jupe est une simple ligne imprimée autour du modèle. Elle n'est pas rattachée à celui-ci et sert essentiellement à préparer le matériau avant d'attaquer la pièce en nettoyant la buse.

La bordure est une surface remplie d'une seule couche sous le modèle. Le modèle est dès lors imprimé sur celle-ci et non plus sur le plateau d'impression directement.

Enfin, le radeau est une grille épaisse située sous le modèle et ayant une empreinte plus grande que celui-ci.

Les deux dernières configurations permettent d'éviter le phénomène de gauchissement, *warping* en anglais, qui consiste en un soulèvement des côtés du moule lors du refroidissement non uniforme de la pièce. De façon à limiter au maximum le gauchissement, la dernière configuration devrait être choisie. Cependant, afin d'éviter d'augmenter davantage le temps d'impression, nous avons choisi d'utiliser des bordures. La figure 5.7 illustre le phénomène.

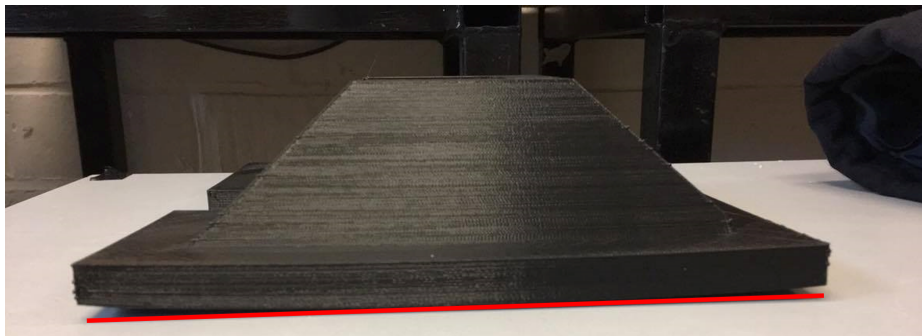


FIGURE 5.7 – Illustration du phénomène de gauchissement

Récapitulatif :

Le tableau 5.3 reprend les valeurs utilisées pour les différents paramètres décrits.

Critère	Valeur	Unité
Matériau principal		
Jeu	0.2	mm
Largeur de ligne	0.35	mm
Hauteur de couche	0.2	mm
# de ligne de paroi verticale	3	-
# de ligne de paroi horizontale	5	-
Taux de remplissage	15	%
Motif de remplissage	Triangulaire	-
Matériau de support		
Taux de remplissage	10	%
Motif de remplissage	Zig-Zag	-
Adhérence au plateau	Bordure	-

Tableau 5.3 – Configuration utilisée pour l'impression des moules

Tout paramètre ne se retrouvant pas dans ce tableau avait pour valeur la valeur par défaut d'une impression de type "Draft", disponible sur le logiciel Cura 2.5.0.

Conclusion :

L'impression 3D est une technique particulièrement adaptée à la réalisation d'une thèse de mémoire. En effet, la possibilité de faire du prototypage rapide fait qu'il est possible de produire un design, le tester, l'améliorer, et l'imprimer à nouveau. De plus, les formes développées étant parfois alambiquées, il est intéressant de pouvoir avoir recours à une technique de fabrication automatisée.

Le premier défaut majeur de l'utilisation d'imprimantes 3D est la fragilité des pièces produites. C'est pourquoi nous recommandons qu'une fois qu'un design est approuvé, son moule soit produit en acier, ou un matériau plus résistant, afin que celui-ci puisse survivre à plus d'une demi-douzaine de cycles moulage-démoulage.

Le second inconvénient inhérent à l'impression 3D est le temps nécessaire à chaque impression. En effet, non seulement les moules sont fragiles mais chaque pièce les composant demande plus de 2 jours d'impression. Plus de 10 jours sont alors nécessaires pour passer d'un design au moule permettant d'effectuer des tests réels en béton.

Enfin, étant donné le nombre d'imprimantes disponibles et le fait que les configurations nécessaires à l'obtention d'un bon produit changent de l'une à l'autre, chaque changement d'imprimante représente un travail considérable par rapport aux techniques classiques.

Chapitre 6

Essais réalisés au laboratoire

Résumé

Afin de rendre compte de l'impact de changements de design effectués et d'étudier le comportement pratique des blocs vis-à-vis de la théorie, de nombreux tests ont été réalisés lors de l'élaboration de ce travail. Ces tests, effectués aussi bien sur des Dricks en béton à taille réelles que sur des modèles réduits imprimés en 3D, ont été riches d'enseignements. Ils ont en effet permis de juger du caractère drone-compatible des éléments que nous avons développé et, au fur et à mesure, de les améliorer pour arriver à ce qu'ils sont à la fin de ce travail.

Au matin du 19 mai 2017, des tests grandeur nature à l'aide d'un drone ont été réalisés et se sont montrés globalement concluants. Des vidéos et figures issus de ces tests sont disponibles pour le lecteur. Notons qu'ils ont permis de mener à des améliorations significatives de design des blocs et ne sont donc plus les versions finales de ceux-ci. Dans un second temps, le 17 août 2017, un essai a été réalisé afin juger des améliorations apportées suite à l'essai du 19 mai 2017. Les conclusions tirées de cet essai, moins complet que le précédent, sont disponibles dans la section 6.3.5, dernière section de ce chapitre.

Le présent chapitre tâche de présenter ces essais ainsi que les informations qu'il est judicieux d'en tirer.

6.1 Essais sur les impressions 3D

Chaque changement de géométrie impliquait de nouveaux essais pour se rendre compte de la fonctionnalité de la solution apportée ainsi que des éventuels problèmes persistants. Au lieu de réaliser en laboratoire des blocs après chaque changement, ce qui nous aurait amenés à des coûts exorbitants, nous avons décidé de réaliser ces modèles à taille réduite en utilisant la technique de l'impression 3D comme illustré à la figure 6.1. Ces modèles, réduits dans un premier temps à une échelle de 1/10 ne permettait pas d'analyser avec précision le jeu nécessaire et présent entre les différents blocs. D'autres impressions à l'échelle 1/5 ont donc été réalisées afin d'être plus représentatives de ces phénomènes.

La majorité de ces blocs sont toujours disponibles et peuvent servir à faciliter la compréhension du fonctionnement des différentes familles de Dricks présentées dans le chapitre 2.

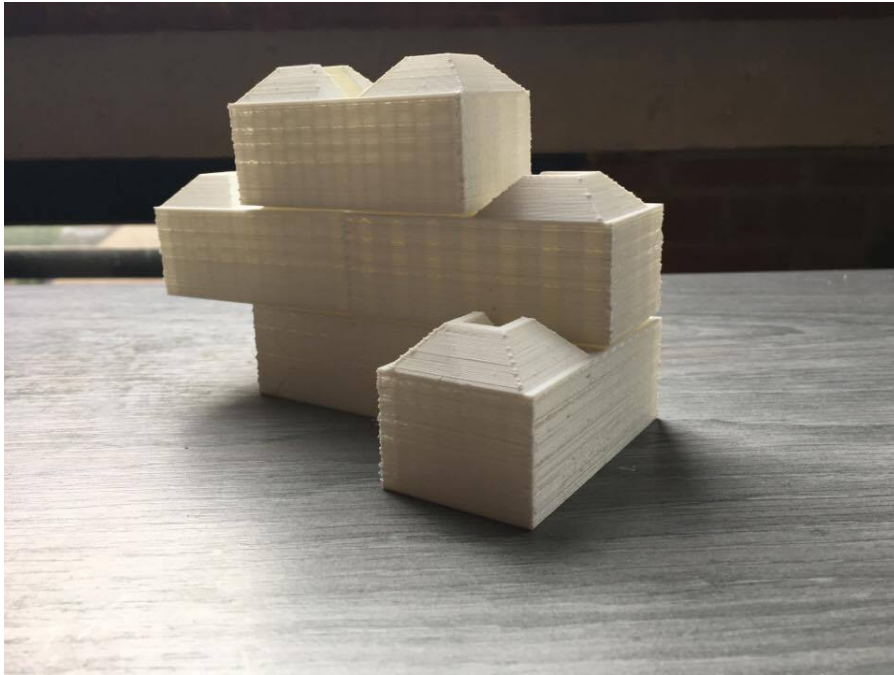


FIGURE 6.1 – Exemple de modèles réduits imprimés en 3D

6.2 Essais sur les Dricks en béton

Après validation de la géométrie grâce aux modèles réduits, nos Dricks LP ont pu être coulés en grandeur nature et en béton afin de réaliser des essais à taille réelle et avec le bon matériau. Ces essais nous ont montré que les dimensions et les matériaux avaient toute leur importance. En effet, certains phénomènes ont pu être mis en évidence que lors des essais à taille réelle alors qu'ils n'étaient pas visibles sur nos modèles réduits.

Ces essais ont principalement consisté en la vérification du bon emboîtement de nos blocs ou de leur bon glissement. Certains essais étaient aussi visuels, notamment ceux concernant le fini des compositions de nos blocs par exemple.

L'un des enseignements principaux tirés des essais à taille réelle est le suivant : lors des essais de glissements des blocs, nous avons remarqué que la rotation du bloc le long de l'axe vertical (le "lacet") était beaucoup moins critique pour le bon glissement de nos blocs que les rotations le long de l'axe horizontal ("roulis" et "tangage"). (Voir figure 6.2).

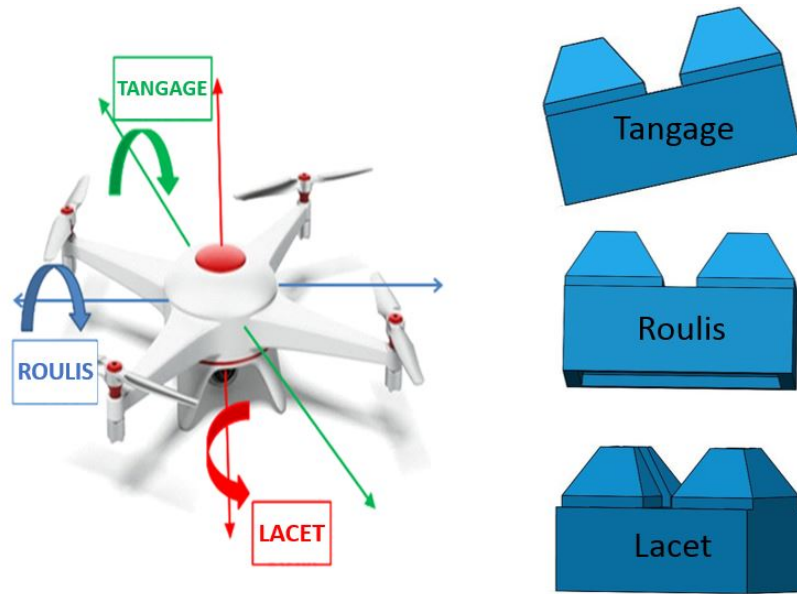


FIGURE 6.2 – Axes de rotation testés lors des essais [28]

Dans la pratique, l'élément amené par le drone arrive de manière relativement horizontale (le lacet et le roulis varient peu) et l'incertitude de rotation est davantage celle le long de l'axe vertical (le lacet) ce qui indique que notre solution est assez adaptée. S'il arrive que le drone n'amène pas le bloc de manière horizontale (tangage et roulis élevés), il est possible que celui-ci se bloque.

Ayant testé plusieurs géométries censées corriger ce problème sans succès, notamment en arrondissant les arêtes des blocs, nous en avons déduit que ce problème, bien que supposé assez rare en pratique, est lié à la nature rugueuse du matériau qu'est le béton. Cette déduction a d'ailleurs été confirmée lors d'un essai au cours duquel nous avons couvert l'ensemble de nos surfaces avec du savon. Dans ce cas le glissement était bien repris quel que soit l'axe de rotation du bloc. Cette hypothèse peut d'ailleurs aussi être confirmée via les essais sur les modèles réduits imprimés en 3D, avec lesquels le glissement est bien meilleur, le matériau étant bien plus lisse. Ce type de blocage ne leur est donc presque jamais applicable.

6.3 Essais des Dricks avec le drone

Un essai en conditions réelles a été réalisé le 19 mai 2017 en collaboration avec le pilote de la société RC TakeOff, monsieur Daris, et le drone de l'UCL. Lors de cet essai, les blocs testés étaient les Drick LP présenté à la figure 2.8, il ne s'agissait donc pas de notre modèle final étant donné que ces essais ont permis d'y parvenir.

Cet essai avait pour but de valider ou de remettre en question la géométrie de nos Dricks LP mais aussi leur "drone-compatibilité". Cet essai est plus représentatif que les essais réalisés au laboratoire sans le drone car il prend en compte une multitude de facteurs inhérents à la construction par drone que l'on ne peut pas facilement simuler en laboratoire.

L'essai s'est donc fait à l'aide d'un pilote expérimenté et non pas à l'aide de drones guidés de manière automatisée, ces systèmes n'étant pas encore assez développés que pour être utilisés dans l'état actuel de la recherche.

Enfin, l'essai a eu lieu en intérieur mais dans des conditions de pilotage plus contraignantes que lors de l'utilisation de drones autonomes. De fait, leur programmation devra être suffisamment développée que pour permettre un transport en douceur des blocs grâce à un système de positionnement et de détection efficace.

6.3.1 Déroulement de l'essai

Lors de l'essai, six Dricks LP drone-compatibles étaient disponibles. Trois d'entre elles ont été placées les unes à cotés des autres et le pilote est venu empiler un par un les trois blocs restant sur ceux déjà en place. Il a ensuite pu les enlever et les changer de place à sa guise. L'essai a duré une quinzaine de minutes et deux vidéos^{1 2} sont disponibles via les QR codes à la figure 6.3.

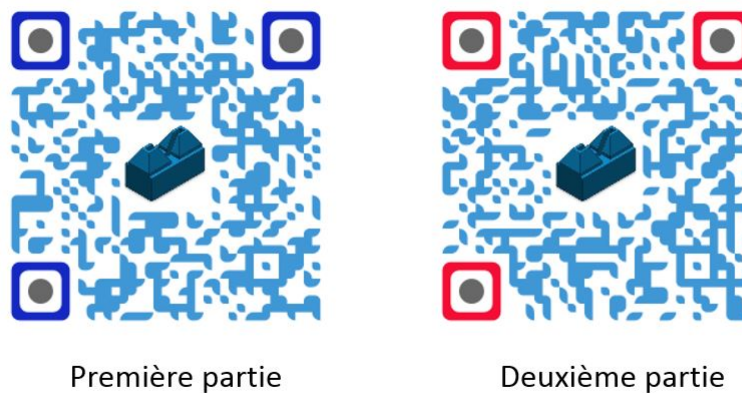


FIGURE 6.3 – QR codes dirigeant vers les vidéos des essais réalisés avec le drone le 19 mai 2017

Pour le lecteur ne disposant pas de la vidéo, les différentes phases accomplies par le drone sont reprises sur la figure 6.4.

Nous avons testé des opérations de pose pour simuler la construction classique mais nous avons aussi testé des opérations de retrait de blocs. Celle-ci permettant de simuler l'action du drone qui vient prendre un bloc dans une zone de stockage pour l'amener sur site. Lors de l'opération de pose, le drone commence en phase de vol (1). S'en suit la préhension du bloc (2) ainsi que le placement sur la structure déjà en place (3).

Lors du retrait d'un bloc, le drone commence par prendre le bloc en zone de stockage (5) pour ensuite le soulever (6) et le transporter jusqu'à la destination voulue (7), et enfin, revenir à la zone de stockage (8) pour réitérer l'opération.

Dans l'état actuel des tests, la préhension d'un bloc et sa pose quelques mètres plus loin durent de 1 à 2 minutes. Ce temps élevé est en grande partie du au fait que l'approche est réalisée par un pilote qui, bien qu'il soit expérimenté, ne peut aller à une trop grande vitesse de façon sécuritaire. La préhension peut se faire de manière directe, mais nécessite encore parfois plusieurs tentatives de la part du pilote avant d'arriver à s'emboîter correctement sur le bloc. Par contre, notons qu'une fois que le drone agrippe l'élément, le transport se fait sans grande difficulté. Le système de préhension fonctionne remarquablement bien.

1. <https://www.youtube.com/watch?v=Ubsx3xuavpo>

2. <https://www.youtube.com/watch?v=bpMkH2-vVPk>

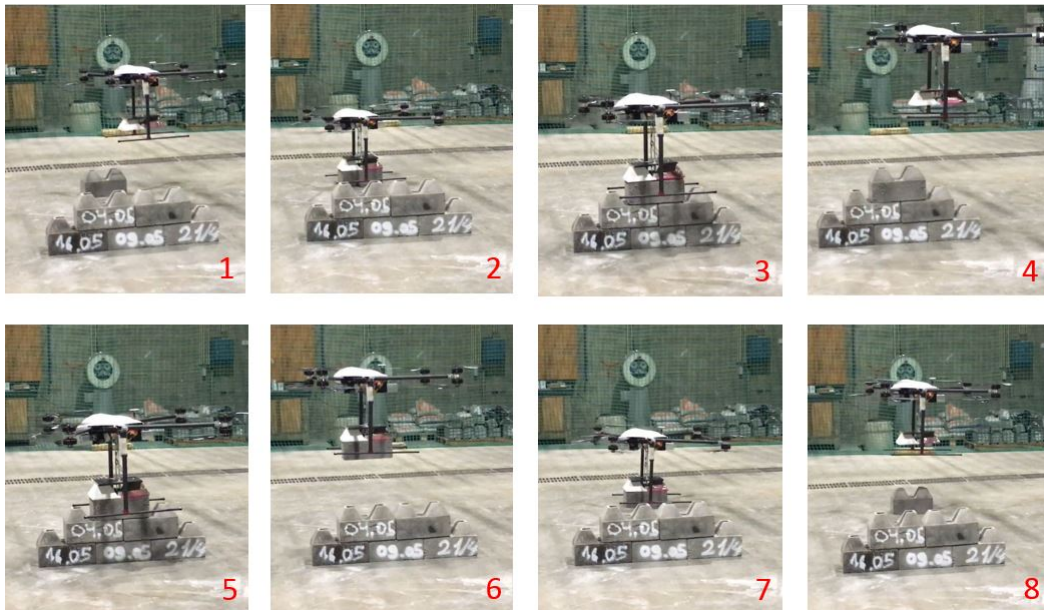


FIGURE 6.4 – Différentes phases des opérations de pose et de retrait réalisés lors des essais

6.3.2 Validations

Grâce à cet essai nous avons pu valider plusieurs choses. Premièrement, notre système de préhension fonctionne remarquablement bien. Celui-ci a d'ailleurs grandement facilité la tâche au pilote en reprenant aisément les 5 cm d'imprécision qui lui sont accordés. Ensuite, le système d'électroaimants fonctionne lui aussi sans encombre. Dans les vidéos on peut voir certains blocs qui ne se détachent pas ou ne se fixent pas correctement au drone. Cela n'est cependant pas dû au système de préhension mais plutôt à l'oubli du pilote de désactiver l'aimant d'une part et à l'absence de plaque métallique sur un des blocs d'autre part, celui-ci étant initialement prévu uniquement comme support aux autres blocs.

Ensuite, on peut remarquer que l'emboîtement est assez bon dans l'ensemble. Il y a certes certains ratés dans la précision mais, in fine, l'ensemble des blocs ont pu être posés.

La simulation des conditions réelles a donc été bien supportée aussi bien par nos blocs que par le pilote et la drone-compatibilité a pu être validée dans ces conditions qui, rappelons-le, étaient, dans une certaine mesure, plus contraignantes que celles supposées lors de l'utilisation de drones autonomes.

6.3.3 Problèmes rencontrés

Certains problèmes ont cependant été rencontrés lors de ces essais. Le premier concerne l'approche du drone qui était souvent perturbée et assez longue. Celle-ci est due à la difficulté que représente le guidage d'un drone de manière manuelle et pourra être efficacement améliorée dans le futur via l'automatisation des déplacements des drones.

Ensuite, on peut constater que sur l'ensemble de l'essai, deux de nos éléments ont chuté. Cette défaillance est due au fait que le pilote a relâché le drone en dehors de la zone de reprise des 5 cm d'imprécision (qui était, rappelons-le, l'hypothèse forte de ce mémoire). Sur la figure 6.5 on voit bien, juste avant le drame, que la Drick LP portée par le drone se situe au niveau du plat des pyramides des Dricks inférieures ce qui empêche la reprise des imprécisions.



FIGURE 6.5 – Dépose manuelle du bloc en dehors de la zone de reprise des imprécisions

Le second problème, lui, concerne la géométrie de nos blocs. En effet, lorsque ceux-ci arrivent avec une trop grande rotation autour de l'axe horizontal ("Tangage" dans notre cas), il est arrivé que certains se bloquent de biais. (Figure 6.6.)



FIGURE 6.6 – Drick LP bloqué en biais lors de la pose de celle-ci par le pilote

Ce problème n'est pas censé arriver. En effet, dans des conditions réelles avec des drones automatisés ceux-ci sont censés arriver le plus droit possible ce qui réduit grandement la rotation du bloc. De plus, les drones automatisés sont supposés utiliser les surfaces de reprise descendante jusqu'à atteindre la position finale. Le blocage des blocs à lieu lorsque, lors des essais avec le pilote, celui-ci lâche la Drick avant que celle-ci ne soit en place et il n'est dès lors plus possible dans le cadre d'une utilisation de drones autonomes. Néanmoins si cela venait à se reproduire, nous conseillons d'utiliser un système de vérification, par exemple via des drones de contrôle munis de caméras. Une autre solution serait d'imposer aux drones de petits mouvements de va-et-vient une fois le bloc supposé en place afin de garantir le glissement de celui-ci s'il venait à être bloqué. En effet, les essais réalisés à la main sur les blocs ont montré que lorsqu'ils sont bloqués de biais, une légère impulsion suffit à vaincre le frottement du bloc et garantir la pose correcte. Notons que ce problème est aussi favorisé par les imprécisions de moulage et le jeu réduit, un soin d'autant plus élevé a donc été apporté aux blocs produits postérieurement à cet essai et le jeu présent sur nos blocs a été augmenté.

Enfin le dernier problème concerne certains blocs qui glissent comme prévu mais ne s'emboîtent pas parfaitement bien une fois posés (figure 6.7). Pour solutionner ce problème, nous avons apporté le changement de géométrie détaillé dans la section 2.4. Le processus de vérification a donc dû être réitéré afin de garantir que le modèle de Drick LP présenté dans ce rapport est bien efficace et pleinement drone-compatible.

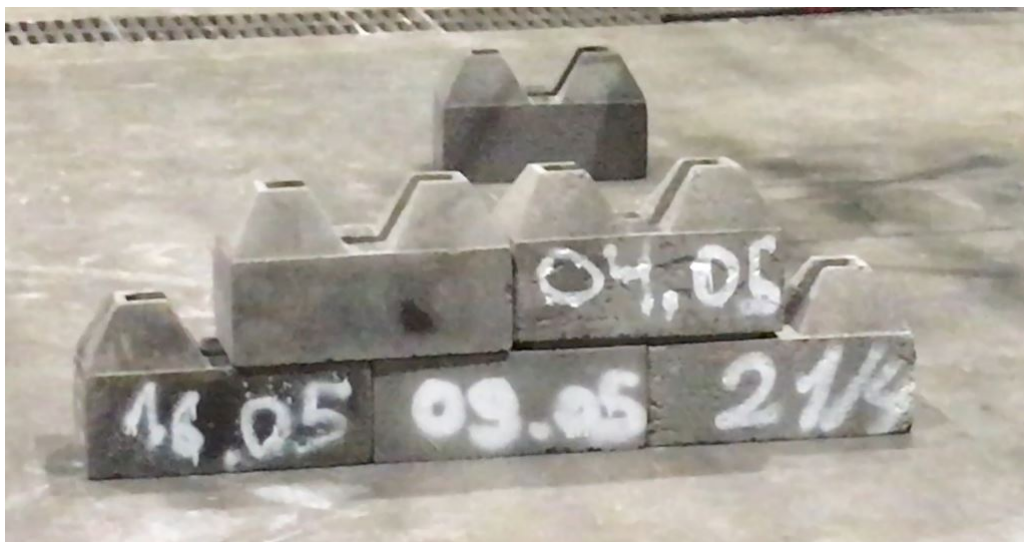


FIGURE 6.7 – Drick LP dont le glissement s'est fait correctement mais dont le placement est imprécis

6.3.4 Conclusions de l'essai du 19 mai 2017

Nos essais nous ont permis de valider les différents changements que nous avons apportés à nos blocs. Pour ce faire, nous avons imprimé en 3D les différentes géométries modélisées sur *SolidWorks*[®]. Une fois les impressions réalisées et validées, nous avons pu passer à l'étape supérieure en réalisant les blocs à taille réelle et avec les bons matériaux. Une batterie de tests complémentaires a ensuite été réalisée et des corrections aux problèmes rencontrés ont été proposées. Une fois cette étape passée, notre modèle a pu être testé en conditions réelles.

Ce processus d'essais et de validations, bien que contraignant, est une garantie du bon fonctionnement de notre modèle. Nous pouvons dès lors garantir que celui-ci est effectivement drone-compatible.

Cependant, certaines problématiques rencontrées lors de ces essais ne peuvent être résolues sans une intégration du système de contrôle des drones. Bien que les éléments constructifs doivent être les plus efficaces possible pour la construction de maisons unifamiliales via un système drone-compatible, le rôle des drones doit lui aussi être adapté au mieux à ce type de construction.

Ces essais ont donc été un moyen de remettre en cause nos réflexions mais ont aussi pu mettre en exergue l'importance de la coopération nécessaire entre les éléments constructifs et les drones.

6.3.5 Conclusions de l'essai du 17 août 2017

L'objet de cet essai a été de tester les améliorations apportées suite à l'essai du 19 mai. Ces adaptations, comme indiqué dans le chapitre 2, consistent en une surélévation des pyramides par l'ajout d'une partie verticale à leur base. Dans le but d'en intégrer les conclusions à ce travail, nous avons pris la décision de ne pas procéder à une longue réimpression d'un système de guide adapté aux nouveaux blocs mais, dans la mesure du possible, d'adapter le système de guide précédemment utilisé. L'adaptation consiste en un abaissement des électroaimants de 2 centimètres de sorte que ceux-ci puissent entrer en contact avec les plaques métalliques sans être encombrés par la présence des pyramides alors surélevées. Celle-ci est illustrée à la figure 6.8.

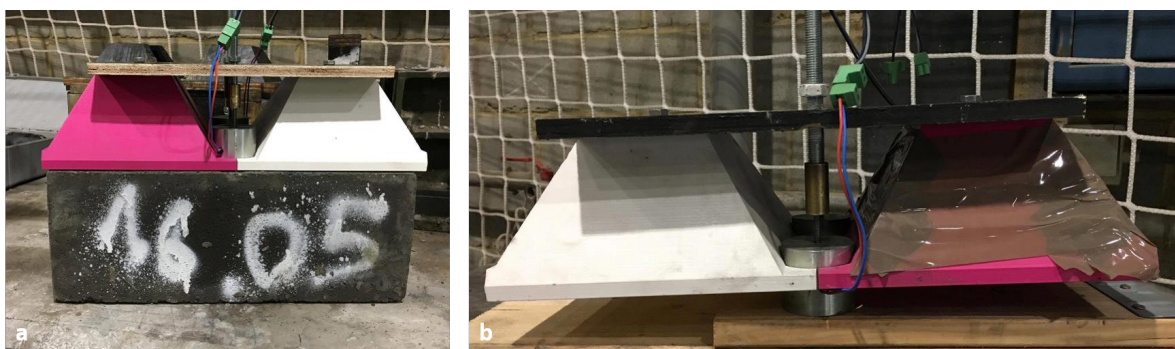


FIGURE 6.8 – a - Système de préhension attaché au bloc lors du premier essai b - Système de préhension adapté lors du second essai

Ce choix a pour conséquences que le glissement ne se fait plus entre le guide et la surface des blocs, mais commence par un glissement des électroaimants sur le bloc. Ce cas de figure entraîne, pour le drone, des perturbations qui peuvent mener à sa déstabilisation. C'est la raison pour laquelle l'essai fut de courte durée, le pilote faisant preuve de prudence en l'écourtant.

Cependant, le bloc pour lequel les opérations de préhension et de dépose se sont déroulées sans encombre présente, comme escompté, une meilleure stabilité une fois en place. La vidéo de l'essai³ est disponible via le QR code de la figure 6.9. Notons que d'autres essais seront réalisés dans le futur et permettront de complètement valider cette nouvelle géométrie.

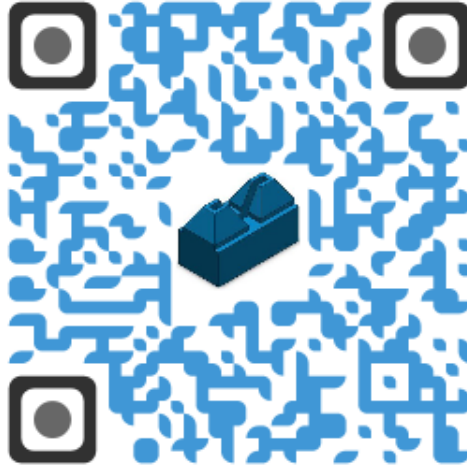


FIGURE 6.9 – QR code dirigeant vers la vidéo de l'essai réalisé avec le drone le 17 août 2017

3. <https://www.youtube.com/watch?v=tG3GzfsKUDE>

Conclusion

Rétrospective du travail

En septembre 2016, alors étrangers à la construction par drones, nous établissions une série d'objectifs à remplir avec, en tête de liste, la construction d'une structure avant la fin du projet.

Pour ce faire, nous avons commencé par définir une liste de critères qu'un élément drone-compatible se doit de respecter, et avons comparé les éléments existants entre eux sur cette base. Le poids, la reprise d'imprécisions, l'absence d'arêtes d'épaisseur nulle, la possibilité de réaliser des assemblages dits Legos[®] et la préhensibilité de l'élément sont, selon nos recherches, les critères clés sur lesquels il est bon de se concentrer.

Ensuite, forts de nos nouvelles connaissances, nous avons pu choisir le modèle présentant, selon nous, le plus gros potentiel : les blocs pyramidaux. De nombreuses considérations et réflexions nous ont alors poussés à continuer le développement de ceux-ci pour, finalement, arriver aux Dricks Light Plus. Ces blocs creux faits en béton léger répondent aux contraintes imposées par la construction drone-compatible mais pas seulement : leur grande adaptabilité permet, entre autres, de réaliser un grand nombre de variantes architecturales.

Les blocs définis, nous nous sommes attachés à déterminer quel est, encore une fois selon des critères objectifs, le système de préhension le plus ad hoc pour la construction par drone. Il s'avère qu'un système d'aimants électropermanents se démarque de la concurrence grâce à sa facilité d'utilisation, sa fiabilité et sa légèreté. De plus, contrairement à ce que l'on pourrait penser de prime abord, les coûts qu'il engendre ne sont pas rédhibitoires et il est envisageable de l'utiliser industriellement.

Les aspects théoriques ayant été développés, les objectifs sur lesquels il nous restait à travailler concernaient les aspects pratiques du travail : réaliser les Dricks LP. Cette étape, riche en enseignements, a pour fondements l'ingéniosité et l'expérience. Le lecteur désireux de produire les Dricks LP sera avisé de la consulter afin de profiter au mieux de mois de développement.

Enfin, une fois les blocs produits après un long processus de fabrication en laboratoire, il était encore nécessaire de les tester et d'approuver leur design et la qualité de leur réalisation. L'objectif initial de construire une petite structure apparut vite utopique. En effet, il est nécessaire de d'abord développer, tester et approuver un type de blocs avant de considérer une production à moyenne échelle. De plus, les manquements éventuels d'un bloc apparaissent lors des phases de tests ce qui recule encore l'échéance. Cependant, nous sommes confiants d'avoir développé des blocs au design robuste qui pourront servir de base solide au développement de la construction en maçonnerie par drone.

Perspectives d'avenir et pistes de réflexion

Des améliorations sont encore à apporter au système développé lors de ce travail, notamment lors de la fabrication des éléments. Nous approchons toujours plus de la sortie de l'étape de prototypage et de l'éventuelle production industrielle. Il est dès lors nécessaire d'implémenter certaines considérations allant au-delà de l'étude de faisabilité d'une construction drone-compatible réalisée en 2015 afin de faire de ce système constructif une réalité. Les points suivants représentent, selon nous, des possibilités d'améliorations notables sur lesquelles nous aurions souhaité nous pencher si le temps nous l'avait permis et qui, selon nous, représentent les prochaines étapes menant à l'aboutissement du système constructif drone-compatible à l'aide de Dricks LP :

1. les améliorations à apporter au système constructif ;
2. l'amélioration de la qualité du mélange de béton utilisé ;
3. l'amélioration de la fabrication des moules afin de permettre une production à plus grande échelle.

Amélioration à apporter au système constructif :

Bien que les Dricks LP développées lors de ce travail permettent de créer une multitude de possibilités architecturales, il reste cependant encore quelques éléments à développer afin de pouvoir construire une maison unifamiliale du premier au dernier bloc.

Il est en effet encore nécessaire de fabriquer et tester des éléments longs. Ceux-ci, à l'image de ce qui est fait par la société Ytong, pourraient se présenter en éléments en U dont les creux seraient remplis une fois en place.

Les planchers nécessitent quant à eux une attention particulière tant les contraintes de poids peuvent représenter un frein à leur développement. À l'image des éléments longs en U, il est possible de s'inspirer de ce qui se fait aujourd'hui dans le monde de la construction. Le système de poutres et claveaux pourrait se voir être adapté pour satisfaire aux critères imposés par la construction drone-compatible. Les poutres et claveaux, versions miniatures des poutres et hourdis, permettent actuellement la construction d'un plancher en béton à la force des bras par une équipe réduite. Un exemple de système composé de poutres et de claveaux est présenté à la figure 6.10



FIGURE 6.10 – Exemple de construction à l'aide de poutres et de claveaux [29]

De plus, une intégration des armatures horizontales, ajoutées aux joints en maçonnerie classique, doit être prévue. En effet, ces armatures aident à la reprise d'éventuels efforts horizontaux et ne font, pour l'instant, pas l'objet d'un design précis. Ceci ne devrait cependant pas présenter un défi trop important. Il est en effet possible d'imaginer un réseau de rainures où les armatures pourraient être déposées par le drone avant que le béton ne soit coulé, comme l'illustre la figure 6.11.

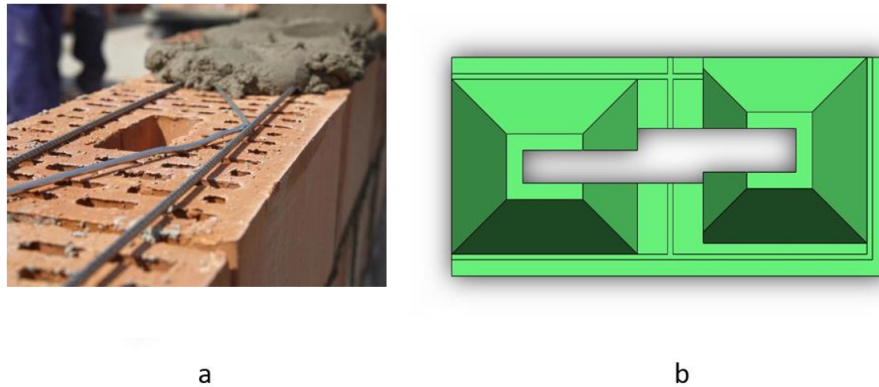


FIGURE 6.11 – Exemple d'utilisation d'armatures horizontales [30] & Drick LPA adaptée pour que des armatures horizontales puissent être incorporées

Enfin, une optimisation de la taille des blocs pourra à terme être réalisée afin que des structures multi-étagées puissent être érigées. En effet, utiliser des blocs de mêmes dimensions sur plusieurs étages ne serait pas optimal. Cette optimisation pourrait en outre être intégrée au programme développé en 2017 par A.-S. Branders et A. Bruneau [31] afin que les instructions à fournir aux drones, qui devront alors choisir parmi différents blocs, leurs soient communiquées au plus tôt.

Amélioration de la qualité du mélange de béton utilisé :

Les résultats obtenus jusqu'à présent sont insuffisants en termes de résistance des blocs. L'utilisation de ciments hautes performances pourrait représenter une solution à l'avenir. Le lecteur trouvera en Annexe A.3 la fiche de composition du béton Pompmix S développé par la société Argex. Celle-ci développe également des blocs légers qui pourraient servir de base à une éventuelle collaboration avec la société qui dispose de plus d'une décennie d'expérience et dont le lecteur désireux de poursuivre le développement de bétons légers pourrait bénéficier. Notons que les bétons développés par Argex sont semblables à ceux développés en laboratoire lors de ce travail.

Il est important de noter que les bétons prévus pour remplir les gaines formées par l'agencement des blocs creux devront être assez fluides que pour pouvoir y descendre suffisamment et remplir correctement les interstices entre les blocs. Les creux devront également être assez larges pour permettre un vibrage du béton. Ce vaste sujet peut, à lui seul, faire l'objet d'une recherche dans le cadre d'un mémoire.

Enfin, aux améliorations à apporter en termes de résistance et aux considérations sur la fluidité des blocs, il convient également d'ajouter des considérations sur le retrait du béton qui, lors du moulage, peut mener à des différences de taille entre les blocs produits. Ce phénomène, facilement compensé par les joints en maçonnerie classique, pourrait mener à des murs non étanches dans le

cadre de la construction drone-compatible. Outre les solutions classiques que sont une attention particulière portée aux blocs lors du séchage ou l'utilisation de mélanges de béton limitant le retrait, mentionnons la possibilité d'effectuer un traitement des blocs après démoulage. Cette technique, appliquée notamment sur les blocs STEPOC présentés précédemment à la figure 4.13, utilise une fraiseuse pour garantir que les dimensions des blocs respectent certaines tolérances. Elle pourrait être couplée à un éventuel traitement de surface permettant, au passage, de lisser certaines surfaces des blocs.

Amélioration de la fabrication des moules :

Afin de réaliser une production à moyenne échelle il est nécessaire que les moules puissent y résister. Dans l'état actuel des choses, ceux-ci subissent trop de dommages et ne survivent pas à quelques cycles de moulage-démoulage. Il est dès lors nécessaire de les réaliser dans des matériaux plus adaptés, et malheureusement plus onéreux. Parmi les matériaux existants et servant à la construction de moules, citons :

- les moules en ABS ;
- les moules composites en polyester ou silicone ;
- les moules en acier.

La solution immédiate serait de paramétrer l'imprimante UltiMaker 3, présente au pôle Génie Civil, afin qu'elle puisse imprimer à l'aide d'ABS, matériau plus résistant que le PLA utilisé jusqu'alors. Il est cependant probable qu'une période d'optimisation plus ou moins conséquente soit nécessaire. Ou, éventuellement, utiliser l'imprimante Fortus 250 MC, propriété du pôle MECA.

La seconde alternative serait l'utilisation de moules composites. Ceux-ci sont typiquement utilisés en production de moyennes séries et permettent de réaliser des formes variées.

Enfin, l'alternative la plus robuste mais malheureusement la plus onéreuse est l'utilisation de moules en acier. Non seulement l'acier est un matériau cher, mais le fait qu'il faille utiliser des techniques d'usinage automatisées afin d'obtenir des dimensions correctes augmente encore davantage le coût qu'ils représentent. La solution que nous considérons comme être la plus proche de ce qui se fait en industrie, illustrée à la figure 6.12, consiste en deux parties en acier. La première, formant les parties extérieures et le haut du bloc serait démontable à l'image des moules permettant de produire des cubes d'essai. La seconde serait formée d'un poinçon qui pourrait être enfoncé avec force dans la première partie lorsque celle-ci est remplie de béton. Cette opération et le vibrage du bloc auraient lieu simultanément afin que le poinçon puisse s'enfoncer correctement. Cette technique, à condition que la quantité de béton à couler soit étudiée, permettrait une mise sous pression du béton à l'intérieur du moule et, ainsi, la formation de surfaces présentant un bon fini. Un lien vers l'animation du processus est disponible en Annexe A.6. Cette technique pourrait éventuellement être poursuivie dans le cadre de la collaboration entre l'IFSB et l'équipe de recherche de l'École Polytechnique de Louvain.

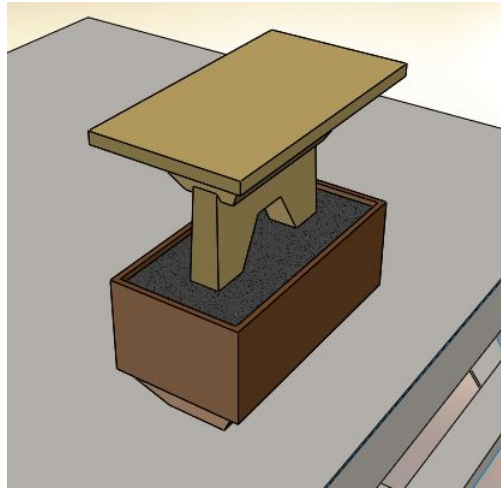


FIGURE 6.12 – Proposition de moule en acier muni d'un poignon sur une table vibrante

Mot de la fin

L'industrie de la construction poursuit sa révolution et sa marche vers plus d'efficacité et de sécurité. Ce travail, bien qu'il ne soit qu'une pierre apportée à l'édifice qu'est la construction drone-compatible, cherche à s'y inscrire. Afin que cette démarche porte ses fruits, il est important de considérer tous les acteurs y intervenant. Les drones ne sont que la partie visible d'une entreprise qui demande la collaboration de nombreux participants.

Il est dès lors important d'insister sur le besoin d'évolution et d'ouverture d'esprit au sein de l'industrie de la construction, une industrie qui s'est malheureusement longtemps contentée d'un statu quo et qui, si elle ne veut pas entendre retentir le son de son hallali, se doit de regarder vers l'avant.

Ce travail est le couronnement non seulement de plusieurs mois de travail, mais également d'années d'efforts. Louvain-la-Neuve a été une ville où, pendant plus de cinq années, il a été possible de vivre une combinaison savante d'instruction et d'épanouissement.

Bibliographie

- [1] A. Simar L. DELANNAY. *LMECA 1451 - Fabrication Mécanique, notes de cours*. 2015. URL : <https://moodleucl.uclouvain.be/mod/folder/view.php?id=517292> (visité le 01/08/2017).
- [2] Patrick DUPIN. *Le Lean Appliqué A La Construction*. EYROLLES, 2017.
- [3] Agence fédérale des risques professionnels FEDRIS. *Fiche sectorielle : Construction*. 2017. URL : http://fedris.be/sites/default/files/assets/FR/Statistiques/Fiches_sectorielles__2015/fiche_sectorielle_nace_41-42-43_fr.pdf (visité le 03/07/2017).
- [4] C. Mueller P. LATTEUR S. Goessens. *Vers une robonumérisation de la construction ?* 34eme Rencontre de l'AUGC, Université de Liège, Liège, Belgique. du 25/05/2016 au 27/05/2016.
- [5] Christophe SALIN. 2017. URL : http://christophesalin.com/wp-content/uploads/2012/02/csalin_hirondelle-fenetre10.jpg (visité le 03/07/2017).
- [6] *Banque d'images libres de droits*. 2017. URL : <https://us.123rf.com/450wm/pakhnyushchyy/pakhnyushchyy1602/pakhnyushchyy160200091/51531767-essaim-d-abeilles-sur-un-nid-d-abeilles.jpg?ver=6> (visité le 03/07/2017).
- [7] M. RENIERS. *Development of elementary BIM tools for drone-compatible construction systems*. Université Catholique de Louvain-la-Neuve, 2016.
- [8] J. Leplat J-S. BRETON. *Faisability Study For Drone-Based Manufacturing Of Architectural Structure*. Université Catholique de Louvain-la-Neuve, 2015.
- [9] C. Coppieters de GIBSON. *Environmental and financial feasibility of a drone-built architectural structure*. Université Catholique de Louvain-la-Neuve, 2016.
- [10] A. Moncourrier A. NAVEAU. *Development of a Drone-Compatible Masonry Construction System*. Université Catholique de Louvain-la-Neuve, 2016.
- [11] P. Latteur S. Goessens C. Mueller M. Reniers M. ZHAO. *Masonry construction with drones*. IASS Annual Symposium 2016 Spatial Structures in the 21st Century, Tokyo, Japan. du 26/09/2016 au 30/09/2016.
- [12] J. Willmann F. Augugliaro T. Cadalbert R. D'Andrea F. Gramazio M. KOHLER. « Aerial Robotic Construction Towards a New Field of Architectural Research ». In : *International Journal of architectural computing* 10.03 (2011), p. 439–459.
- [13] A. Mirjan F. Gramazio M. Kohler F. Augugliaro R. D'ANDREA. *Architectural fabrication of tensile structures with flying machines*. 2nd international conference on sustainable, intelligent manufacturing, Lisbon, Portugal. 26/06/2016 au 29/06/2013.
- [14] N. Nerhi A. PAQUES. *Étude et conception de l'architecture de contrôle d'un drone destiné à la construction d'une structure en intérieur*. ECAM, 2016.

- [15] P. Latteur S. Goessens C. MUELLER. *Automation and construction, High-tolerance masonry systems for UAV-based construction*. Article en cours de soumission. 2017.
- [16] AMAZON. 2017. URL : https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/415jfbRF12L._AC_UL115_.jpg (visité le 16/08/2017).
- [17] Béton de la LOMME. 2017. URL : <http://www.betondelalomme.be/fr/blocs-coffrage-stepoclomme> (visité le 16/08/2017).
- [18] XELLA. *Ytong*. 2017. URL : https://www.xella.be/fr/ytong_1331.php (visité le 22/07/2017).
- [19] AUTOCONSTRUCTIONMAISONBC. 2017. URL : <http://autoconstructionmaisonbc.u.a.f.unblog.fr/files/2011/05/soussol1.jpg> (visité le 16/08/2017).
- [20] XELLA. 2017. URL : https://www.xella.be/fr/lateien_1189.php (visité le 16/08/2017).
- [21] POLISOL. 2017. URL : <http://www.polisol.eu/fr/sols-industriels/fibres-metalliques> (visité le 16/08/2017).
- [22] B. HERMAN. *How to make a good impression ?* 2016. URL : https://moodleucl.uclouvain.be/pluginfile.php/1523933/mod_resource/content/1/2016.09.22%5C%20-%5C%20How%5C%20to%5C%20make%5C%20a%5C%20good%5C%20impression.pdf (visité le 17/07/2017).
- [23] A. SIMAR. *LMECA2453 : Lecture 5-6 : Additive manufacturing*. 2017. URL : https://moodleucl.uclouvain.be/pluginfile.php/1566771/mod_resource/content/1/MECA2453_Lecture6-7_Additive_manufacturing.pdf (visité le 17/07/2017).
- [24] Ultimaker BV. *Ultimaker - Choose the perfect material*. 2017. URL : <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-3> (visité le 29/07/2017).
- [25] ANIWAA.FR. 2017. URL : <http://www.aniwaa.fr/wp-content/uploads/2015/08/3d-printer-Stratasys-Fortus-250mc-perspective.jpg> (visité le 16/08/2017).
- [26] LEAPFROG. 2017. URL : <https://www.lpfrg.com/fr/creatr-hs/> (visité le 16/08/2017).
- [27] ULTIMAKER. 2017. URL : <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-3> (visité le 16/08/2017).
- [28] N. Casamassima D. Cantoni L. Mottola K. Whitehouse E. BREGU. *Reactive Control of Autonomous Drones*. The International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. 2016. URL : <https://www.semanticscholar.org/paper/Reactive-Control-of-Autonomous-Drones-Bregu-Casamassima/26b43edc5fa18e72c3f3b98a452b8997fec68742> (visité le 06/08/2017).
- [29] HANSEZ-DALEM. *Poutrains et claveaux*. 2017. URL : <http://www.hansez-dalem.be/produits/poutrains-et-claveaux/> (visité le 15/08/2017).
- [30] BEKAERT. *Une finition impeccable de votre maçonnerie avec les armatures Murfor*. URL : <http://www.livios.be/fr/info-construction/extra/cherchez-et-trouvez/cherchez-une-entreprise/10554-39336/bekaert/une-finition-impeccable-de-votre-maconnerie-avec-les-armatures-murfor-reg/> (visité le 15/08/2017).
- [31] A.-S. Branders A. BRUNEAU. *Etude de faisabilité de l'intégration des constructions drone compatible dans les modèles BIM*. Université Catholique de Louvain-la-Neuve, 2017.

Table des figures

1	Hirondelle [5] et abeilles construisant leur nid [6]	2
2	Illustration des 4 étapes de la construction par drones [7]	3
3	Structure drone-compatible composée de colonnes	4
4	Tour de 6 mètres de haut et pont suspendu réalisés à l'aide de drones à ETH Zurich [12] [13]	5
1.1	Drone développé à l'Université catholique de Louvain [4]	10
1.2	Reprise des imprécisions	12
1.3	Surfaces de reprise des imprécisions	12
1.4	Assemblage en colonne	13
1.5	Assemblage en Legos [®]	13
1.6	Système de pose en pyramide	14
1.7	Système de pose mâle-femelle	14
1.8	Illustration du problème des arêtes d'épaisseur nulle	15
1.9	Cônes	16
1.10	a. Réalisation d'une colonne par empilement de cônes. b. Blocage possible des cônes.	17
1.11	Bloc à doubles cônes	18
1.12	Blocs coniques avec barres de guidage	19
1.13	Problème lié à la surface de reprise de type adjacente des blocs en doubles cônes	19
1.14	Problème d'arêtes d'épaisseur nulle dans le cas des blocs coniques	20
1.15	Droxel (a) et Droxel-T (b)	20
1.16	Exemples des multiples designs possibles à l'aide de Droxels	21
1.17	Bloc pyramidaux	22

1.18	Positionnements possibles des blocs pyramidaux	23
1.19	Bloc mâle-femelle	24
1.20	Redondance des surfaces de reprise des imprécisions	24
1.21	Agencement des blocs mâle-femelle	25
1.22	Géométrie complexe des coins liée aux blocs mâle-femelle	25
1.23	Exemples de Droxels-R	26
2.1	Modèle de départ : les blocs pyramidaux	31
2.2	Variation d'angle pour des blocs pyramidaux	32
2.3	Plan du modèle de départ (en mm)	33
2.4	Idée initiale pour éviter les épaisseurs nulles	34
2.5	Plan de la solution sans arêtes d'épaisseur nulle (en mm)	35
2.6	Jour entre les rangées de Dricks (en mm)	35
2.7	Analyse des surfaces de reprise du modèle des blocs pyramidaux	36
2.8	Plan de la solution après suppression des arêtes d'épaisseur nulle et réduction du poids (en mm)	37
2.9	Problème lié à l'évidage du bloc	38
2.10	Présence de gaines se formant lors de l'empilement de nos blocs	38
2.11	Blocage lors des essais en laboratoire avec l'utilisation du drone	40
2.12	Zone verticale permettant le bon emboîtement (en mm)	41
2.13	Drick LP (en mm)	42
2.14	Exemple de mur réalisé avec des Dricks LP	42
2.15	Dricks LPAL et LPLAR	43
2.16	Adaptation d'une Drick LP en Drick LPAL	44
2.17	Exemple d'un mur de coin en Dricks LPAL et LPLAR	44
2.18	Dricks LPLT et LPLD	45
2.19	Dricks LPLS et LPLA	45
2.20	Exemple d'une ouverture utilisant l'ensemble des Dricks LPL	45
2.21	Coupe dans l'extrusion particulière du LPLT et surfaces de reprise adjacentes inutiles supprimées sur les 4 pyramides du LPLT	46

2.22	Dricks LPCS et LPCD	47
2.23	Exemple d'utilisation des Dricks LPC, en rouge les LPCS et en gris les LPCD . .	47
2.24	Exemple d'utilisation particulière du LPCD pour des fenêtres doubles	47
2.25	Dricks LPB et exemple de leur utilisation	48
2.26	Exemple d'utilisation des Dricks pour la construction de maisons unifamiliales . .	48
3.1	Exemple d'électroaimant [16]	52
3.2	a - Système de préhension attaché au bloc b - Système de préhension décroché .	54
3.3	Système de pince levage pour blocs développé au LEMSC [10]	55
3.4	Illustration des problèmes liés à l'encombrement du système de pince de levage. .	56
3.5	Système de levage à l'aide d'une membrane gonflante et d'un harpon de guidage	57
4.1	Particle Size Distribution de l'Argex concassé pour une ouverture de 6cm [10] . .	62
4.2	État de surface insuffisant dû aux billes de polystyrène qui remontent à la surface.	64
4.3	État de surface obtenu relativement correct	65
4.4	Moule utilisé pour réaliser les Dricks LP	65
4.5	Moule avec parties déchiquetées, décollées et cassées après 4 utilisations	67
4.6	Moule équipé d'attaches type "boite à outils" et de planches de renforcement . .	68
4.7	Plat métallique équipé de pâte collante destiné à être collé au moule	69
4.8	Vibrage du béton à la tige. Les billes d'Argex remontent et si aucun contrôle n'est fait, entraînent un mauvais état de surface	69
4.9	Moule dont les pentes étaient initialement couvertes de silicone	70
4.10	Dispositif d'essai des Dricks LP	71
4.11	Dispositif d'essai des cubes de béton	72
4.12	Courbe de chargement du béton léger	72
4.13	Blocs armés Stepoc remplis de béton frais [17]	73
4.14	Résultat de l'essai d'étalement à la table à choc	74
4.15	Bloc Ytong [19]	75
4.16	Élément long en Ytong [20]	76
4.17	Béton fibré [21]	76

5.1	Principe de la technique d'impression par dépôt de fil en fusion [22]	79
5.2	Imprimantes disponibles à l'Université catholique de Louvain : Fortus 250 MC [25] - LeapFrog Creatr HS [26] - Ultimaker 3 Extended [27]	80
5.3	Jeu de 0.2 mm entre les pièces imprimées	82
5.4	Les lignes de parois, dont une est entourée en rouge, sont les lignes composants la surface extérieure du moule	83
5.5	Bleu : Matériau de support - Jaune : Lignes de paroi horizontale - Rouge : Lignes de paroi verticale	84
5.6	La surface en pente soutenue lors de l'impression présente des indentations	84
5.7	Illustration du phénomène de gauchissement	85
6.1	Exemple de modèles réduits imprimés en 3D	88
6.2	Axes de rotation testés lors des essais [28]	89
6.3	QR codes dirigeant vers les vidéos des essais réalisés avec le drone le 19 mai 2017	90
6.4	Différentes phases des opérations de pose et de retrait réalisés lors des essais	91
6.5	Dépose manuelle du bloc en dehors de la zone de reprise des imprécisions	92
6.6	Drick LP bloqué en biais lors de la pose de celle-ci par le pilote	92
6.7	Drick LP dont le glissement s'est fait correctement mais dont le placement est imprécis	93
6.8	a - Système de préhension attaché au bloc lors du premier essai b - Système de préhension adapté lors du second essai	94
6.9	QR code dirigeant vers la vidéo de l'essai réalisé avec le drone le 17 août 2017	95
6.10	Exemple de construction à l'aide de poutrains et de claveaux [29]	98
6.11	Exemple d'utilisation d'armatures horizontales [30] & Drick LPA adaptée pour que des armatures horizontales puissent être incorporées	99
6.12	Proposition de moule en acier muni d'un poinçon sur une table vibrante	101
A.1	Dimensions du cône	151
A.2	Dimensions des Blocs coniques	152
A.3	Dimensions des Blocs pyramidaux	155
A.4	Dimensions des Blocs Mâle-Femelle	156
A.5	QR codes dirigeant vers les vidéos illustrant les comportements des Dricks LP	159
A.6	QR codes dirigeant vers notre proposition de moulage industriel	160

Liste des tableaux

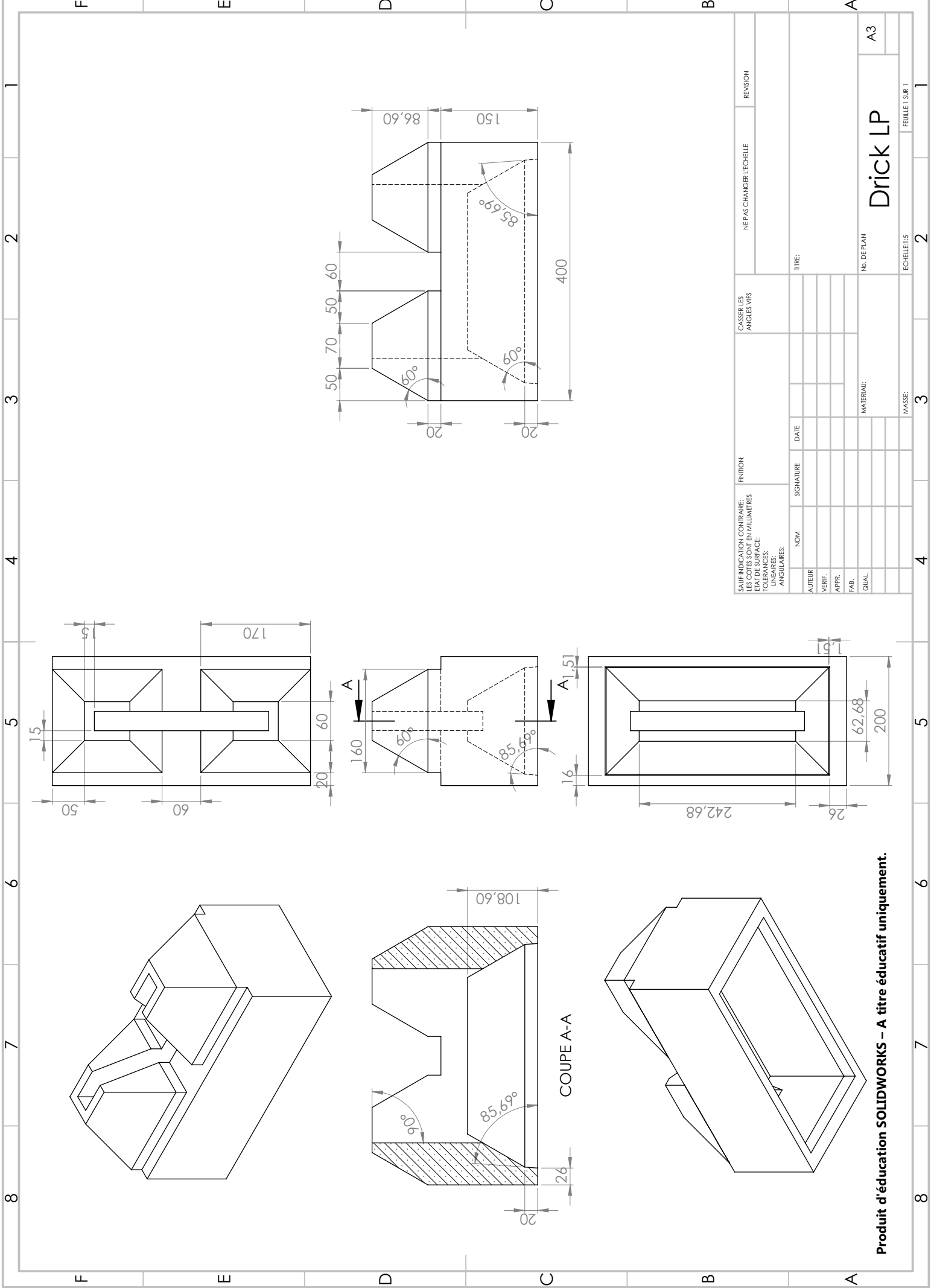
1.1	Caractéristiques des différents systèmes de guidage	11
1.2	Avantages et inconvénients des cônes	17
1.3	Avantages et inconvénients des blocs à doubles cônes	20
1.4	Avantages et inconvénients des Droxels	22
1.5	Avantages et inconvénients des blocs pyramidaux	23
1.6	Avantages et inconvénients des blocs mâle-femelle	25
1.7	Avantages et inconvénients des Droxels-R	27
1.8	Comparatif des différentes solutions existantes	28
2.1	Récapitulatif des Dricks LP	49
3.1	Tableau récapitulatif des avantages et inconvénients du système de préhension par aimants	54
3.2	Tableau récapitulatif des avantages et inconvénients du système de préhension par pince de levage	57
3.3	Tableau récapitulatif des avantages et inconvénients du système de préhension par membrane gonflante	58
3.4	Tableau récapitulatif des avantages et inconvénients des différents systèmes de levage	59
3.5	Prix des composants de la Drick LP	60
4.1	Caractéristiques de l'entraîneur d'air	63
4.2	Caractéristiques des plastifiants et super-plastifiants	63
4.3	Caractéristiques du polystyrène expansé	63
4.4	Composition de base pour une Drick LP et un cube 20x20x20 cm^3	64

5.1	Description des matériaux utilisés en impression 3D	80
5.2	Volumes imprimables des imprimantes 3D mises à disposition par l'EPL	81
5.3	Configuration utilisée pour l'impression des moules	85

Annexe A

Annexes

A.1 Plans de la Drick LP et de ses variantes

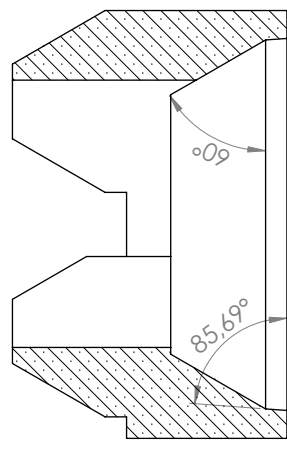
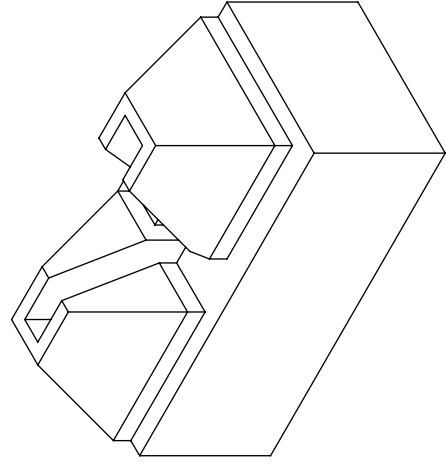
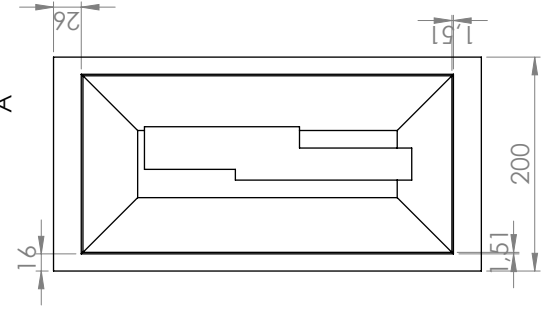
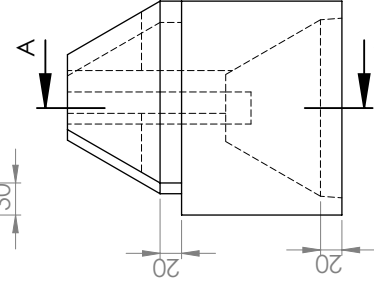
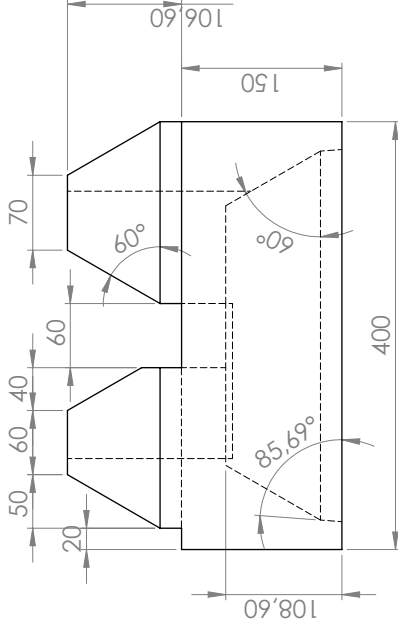
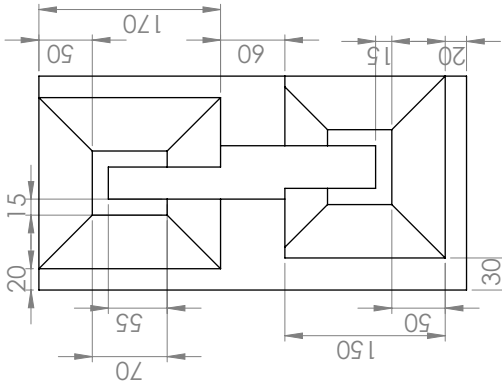


SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		REVISION	
ETAT DE SURFACE:							
TOLERANCES:							
LIGNAIRES:							
ANGULAIRES:							
AUTEUR	NOM	SIGNATURE	DATE	TITRE:			
VERIF.							
APPR.							
PAB.							
QUAL.				MATERIAU:			
				No. DE PLAN			
				Echelle: 1 sur 1			
				Feuille 1 sur 1			

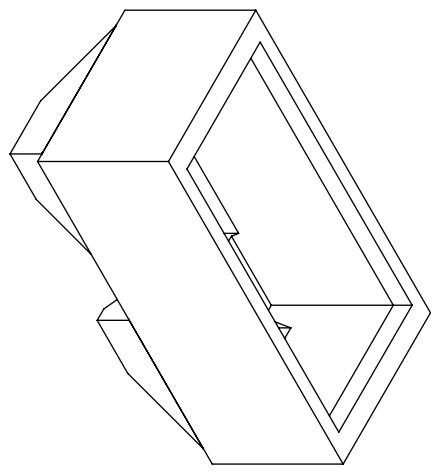
Produit d'éducation SOLIDWORKS – A titre éducatif uniquement.

Drick LP

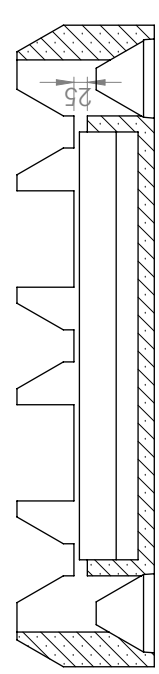
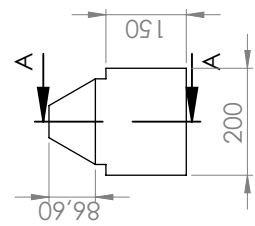
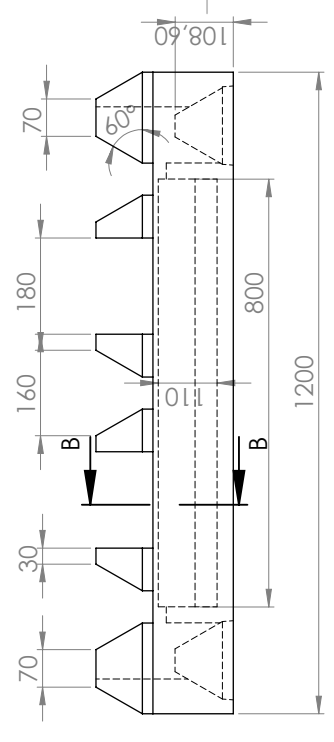
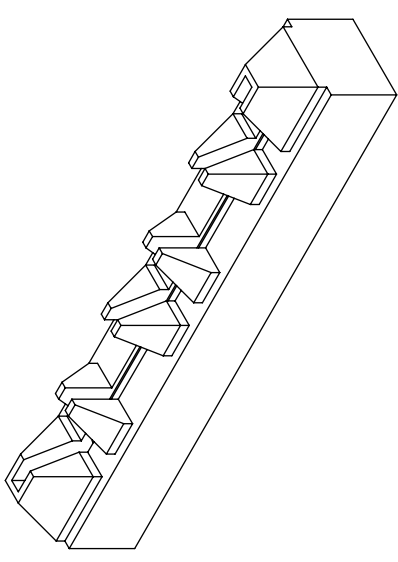
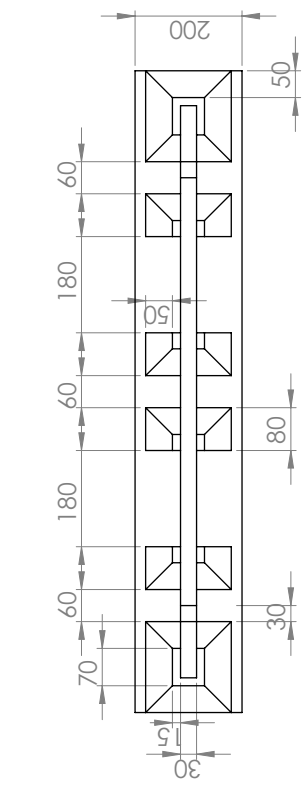
A3



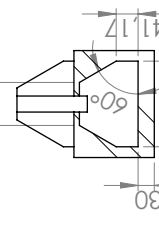
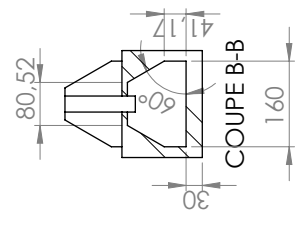
COUPE A-A



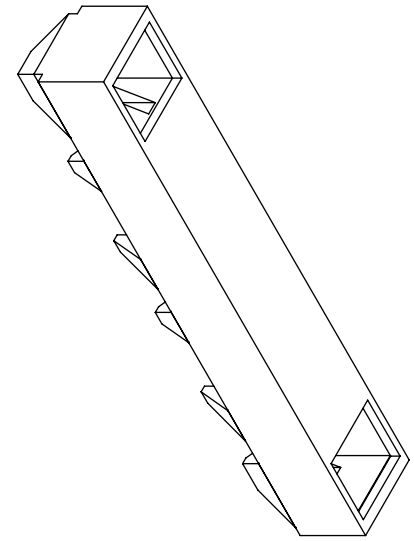
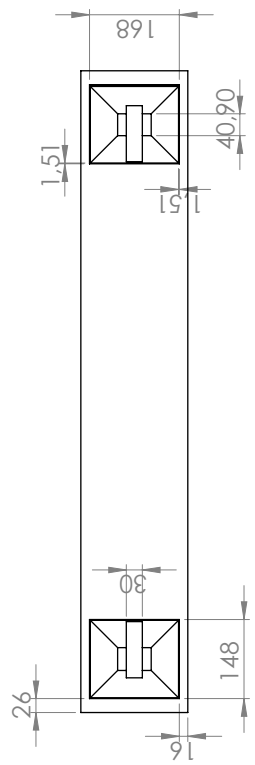
SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		REVISION	
ETAT DE SURFACE:							
TOLERANCES:							
LINEAIRES:							
ANGULAIRES:							
AUTEUR	NOM	SIGNATURE	DATE	TITRE:			
VERIF.							
APPR.							
PAB.							
QUAL.				MATERIAU:			
						No. DE PLAN	
						A3	
				ECHELLE(S)		FEUILLE(S) SUR 1	
				2		1	



COUPE A-A



COUPE B-B

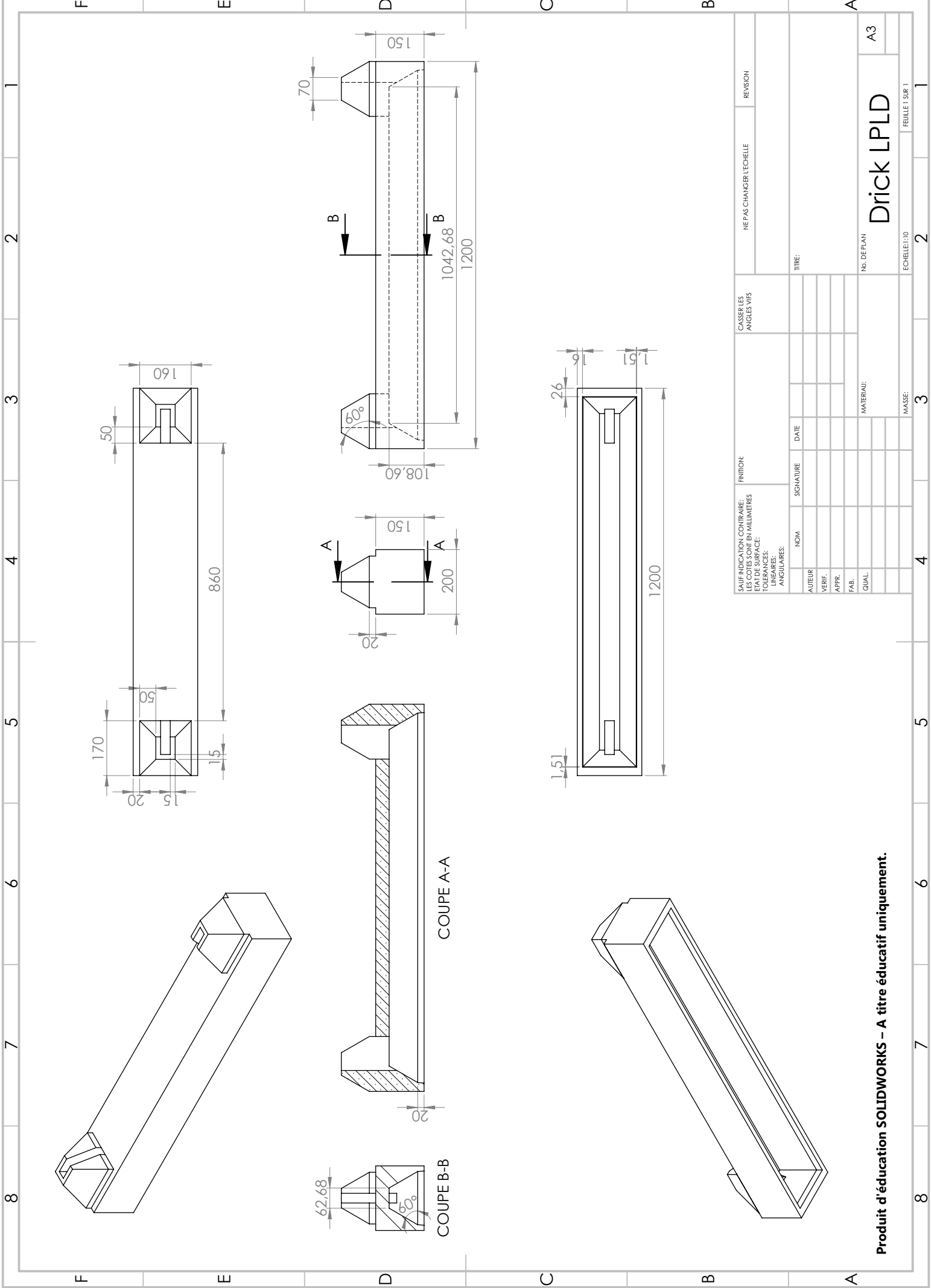


SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES		FINITION:		CASSER LES ANGES VIFS		REVISION	
ETAT DE SURFACE:							
TOLERANCES:							
LINEAIRES:							
ANGULAIRES:							
AUTEUR	NOM	SIGNATURE	DATE	TITRE:			
VERIF.				No. DE PLAN			
APPR.				Echelle: 1/00			
PAB.				FEUILLE SUR 1			
QUAL.				MATERIAU:			
				MASSE:			

Drick LPL

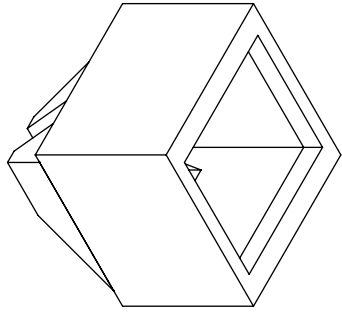
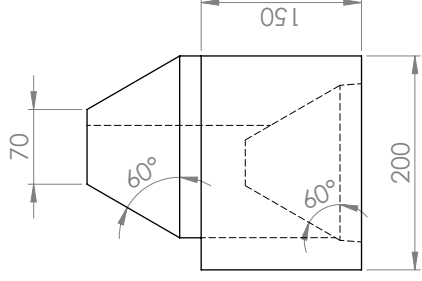
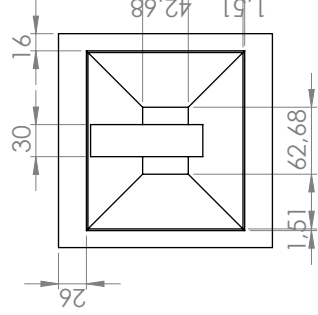
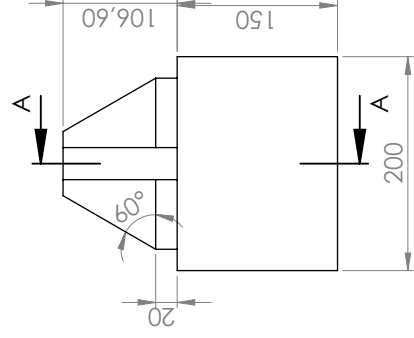
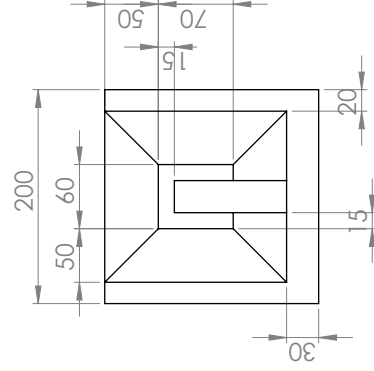
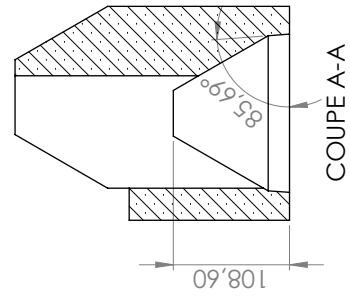
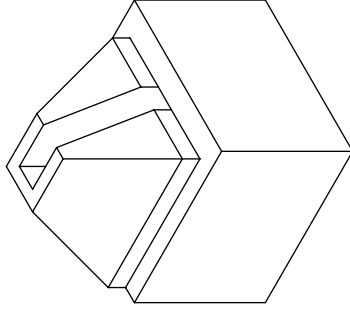
A3

Produit d'éducation SOLIDWORKS – A titre éducatif uniquement.



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES		FINITION:		CASSER LES ANGLES Vifs		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION			
TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:		NO. DE PLAN		TITRE:		Echelle: 1/00		FEUILLE 1 SUR 1			
AUTEUR	VERIF.	APPR.	PAB.	QUAL.	MATERIAU:	No. DE PLAN		A3			
NOM	SIGNATURE	DATE	MASSE:		2		3		4		
Drick LPLD		3		4		5		6		7	
2		3		4		5		6		7	
2		3		4		5		6		7	

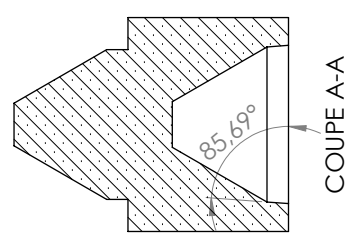
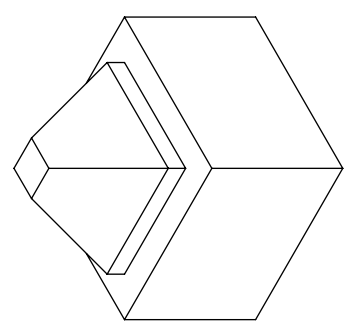
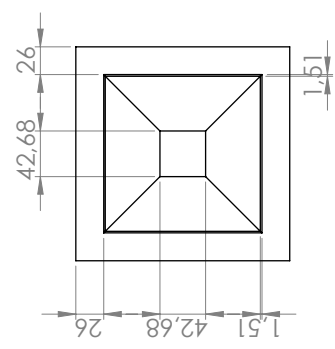
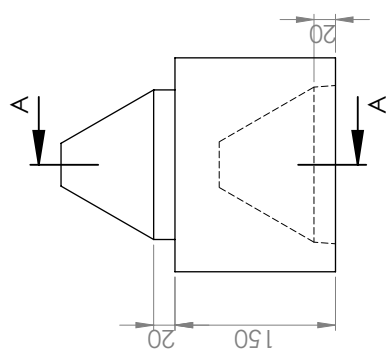
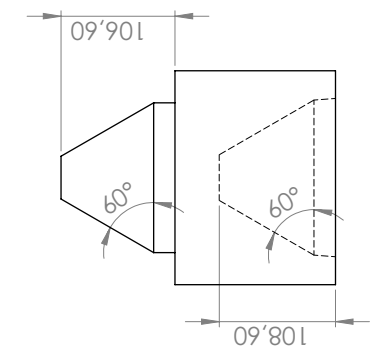
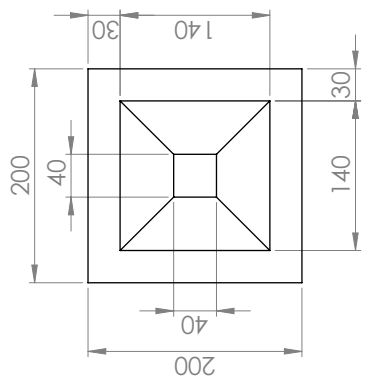
Produit d'éducation SOLIDWORKS – A titre éducatif uniquement.



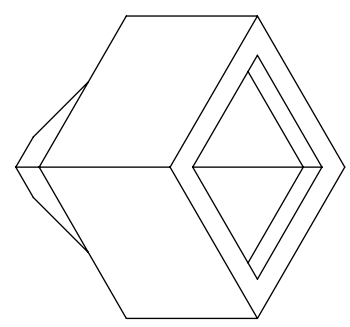
Produit d'éducation SOLIDWORKS – A titre éducatif uniquement.

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		REVISION	
ETAT DE SURFACE:						NE PAS CHANGER L'ECHELLE	
TOLERANCES:							
LINEAIRES:							
ANGULAIRES:							
AUTEUR	NOM	SIGNATURE	DATE	TITRE:			
VERIF.							
APPR.							
PAB.							
QUAL.				MATERIAU:			
				No. DE PLAN			
				A3			
				ECHELLE(S)		FEUILLE(S) SUR 1	
				3		2 1	

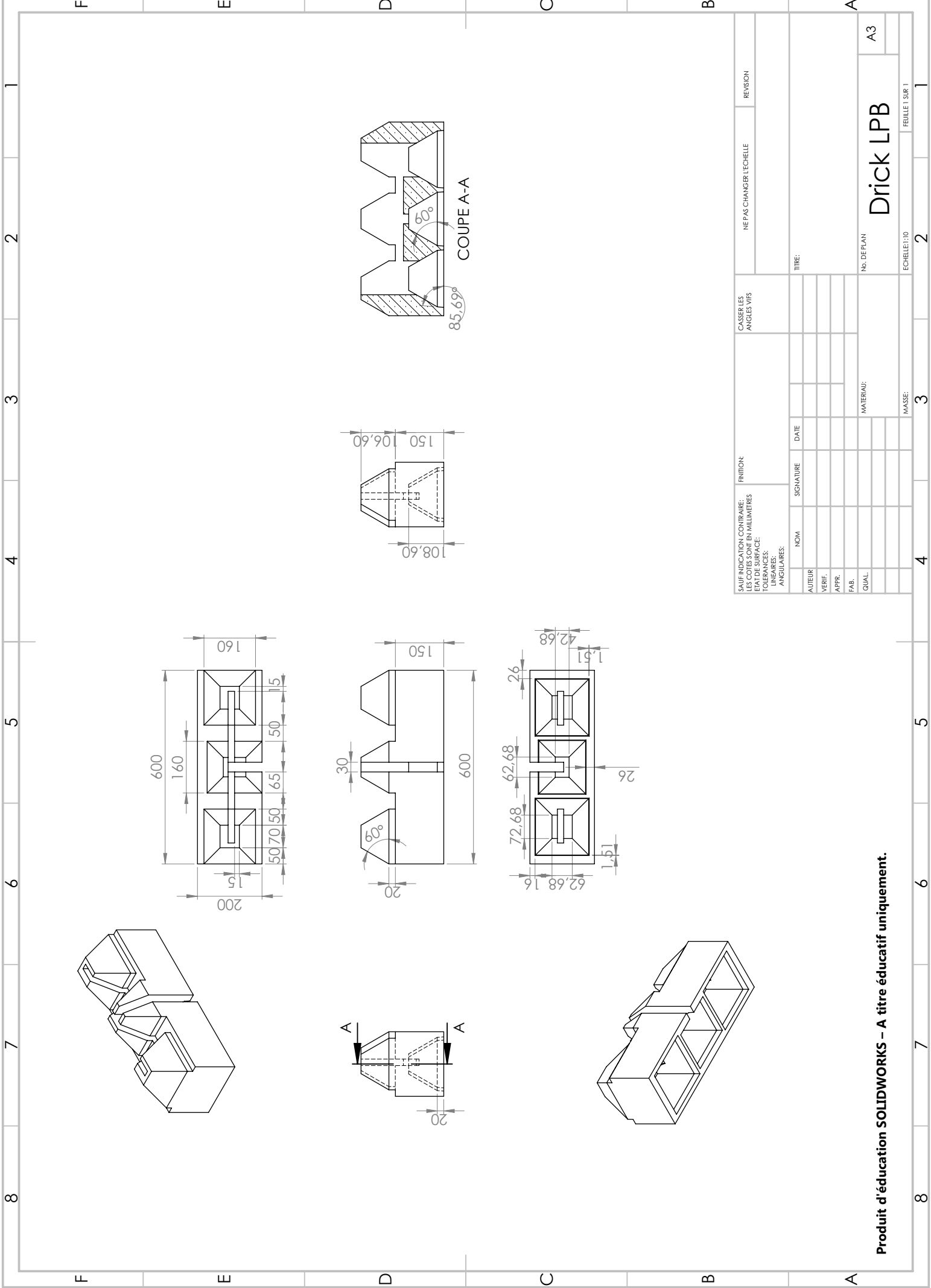
Drick LPL



COUPE A-A



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES		FINITION:		CASSER LES ANGLÉS Vifs		REVISION	
ETAT DE SURFACE:		NOVA		SIGNATURE		TITRE:	
TOLERANCES:		DATE		MATERIAU:		No. DE PLAN	
ANGULAIRES:		AUTEUR		VERIF.		Echelle: 1 sur 1	
		APPR.		PAB.		A3	
		QUAL.		MASSE:		Drick LPC	
						FEUILLE SUR 1	



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES		FINITION:		CASSER LES ANGES VIFS		REVISION	
ETAT DE SURFACE:							
TOLERANCES:							
LINEAIRES:							
ANGULAIRES:							
AUTEUR	NOM	SIGNATURE	DATE	TITRE:			
VERIF.				NE PAS CHANGER L'ECHELLE			
APPR.							
PAB.							
QUAL.				No. DE PLAN			
				MATERIAU:			
				Echelle: 1/00			
				FEUILLE SUR 1			

Drick LPB

A3

Produit d'éducation SOLIDWORKS – A titre éducatif uniquement.

A.2 Fiches techniques des matériaux d'impression 3D

Technical data sheet ABS

Ultimaker

Chemical name	Acrylonitrile butadiene styrene
Description	Used by an array of industries worldwide, ABS is known for its exceptional mechanical properties. Our ABS is specifically formulated to minimize warping and ensure consistent interlayer adhesion.
Key features	Excellent mechanical properties and interlayer adhesion (especially when using the front enclosure add-on), nice aesthetics, minimal warping and reliable bed adhesion.
Applications	Visual and functional prototyping and short run manufacturing.
Non-suitable for	Food contact and in-vivo applications. Long term UV exposure can negatively affect properties of an ABS print. Applications where the printed part is exposed to temperatures higher than 85 °C.

Filament specifications

	<u>Value</u>	<u>Method</u>
Diameter	2.85±0.10 mm	-
Max roundness deviation	0.10 mm	-
Net filament weight	750 g	-
Filament length	~107 m	-

Color information

<u>Color</u>	<u>Color code</u>
ABS Black	RAL 9017
ABS White	RAL 9003
ABS Red	RAL 3020
ABS Blue	RAL 5002
ABS Silver	RAL 9006
ABS Pearl Gold	RAL 1036
ABS Green	RAL 6018
ABS Orange	RAL 2008
ABS Yellow	RAL 1023
ABS Gray	RAL 7011

Mechanical properties (*)

	<u>Injection molding</u>		<u>3D printing</u>	
	Typical value	Test method	Typical value	Test method
Tensile modulus	2030 MPa	ISO 527 (1 mm/min)	1681.5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Tensile stress at yield	43.6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)	39.0 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Tensile stress at break	-	-	33.9 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at yield	4.8 %	ISO 527 (50 mm/min)	3.5 %	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at break	34 %	ISO 527 (50 mm/min)	4.8 %	ISO 527 (50 mm/min)
Flexural strength	-	-	70.5 MPa	ISO 178
Flexural modulus	-	-	2070.0 MPa	ISO 178
Izod impact strength, notched (at 23°C)	-	-	10.5 kJ/m ²	ISO 180
Charpy impact strength (at 23°C)	58 kJ/m ²	ISO 179	-	-
Hardness	-	-	76 (Shore D)	Durometer

Thermal properties

	<u>Typical value</u>	<u>Test method</u>
Melt mass-flow rate (MFR)	41 g/10 min	ISO 1133 (260 °C, 5 kg)
Heat deflection (HDT) at 0.455 MPa	-	-
Heat deflection (HDT) at 1.82 MPa	-	-
Vicat softening temperature at 10N	97 °C	ISO 306
Glass transition	-	-
Coefficient of thermal expansion	-	-
Melting temperature	225-245 °C	ISO 294
Thermal shrinkage	-	-

Other properties

	<u>Typical value</u>	<u>Test method</u>
Specific gravity	1.10	ISO 1183
Flame classification	-	-

(*) See notes.

Technical data sheet CPE

Ultimaker

Chemical name	Copolyester
Description	CPE is chemical resistant, strong, tough and demonstrate good dimensional stability. CPE is available in a wide range of colors to choose from, including gray scale for more professional looking models.
Key features	Excellent chemical resistance, toughness and dimensional stability, good interlayer adhesion (especially when using the front enclosure add-on), and low levels of ultrafine particles (UFPs) and volatile organic compounds (VOCs).
Applications	Visual and functional prototyping and short run manufacturing.
Non-suitable for	Food contact and in-vivo applications. Long term outdoor usage or applications where the printed part is exposed to temperatures higher than 70 °C.

Filament specifications

	<u>Value</u>	<u>Method</u>
Diameter	2.85±0.10 mm	-
Max roundness deviation	0.10 mm	-
Net filament weight	750 g	-
Net filament length	~93 m	-

Color information

<u>Color</u>	<u>Color code</u>
CPE Black	RAL 9017 (est.)
CPE White	RAL 9010 (est.)
CPE Light Gray	RAL 7035
CPE Dark Gray	RAL 7043
CPE Red	RAL 3028 (est.)
CPE Blue	RAL 5012 (est.)
CPE Yellow	RAL 1021 (est.)
CPE Green	Pantone 368C (est.)
CPE Transparent	n/a

Mechanical properties (*)

Injection molding

3D printing

	Typical value	Test method	Typical value	Test method
Tensile modulus	1900 MPa	ASTM D638	1537.5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Tensile stress at yield	50 MPa	ASTM D638	41.1 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Tensile stress at break	28 MPa	ASTM D638	37.7 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at yield	5 %	ASTM D638	4.7 %	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at break	100 %	ASTM D638	5.1 %	ISO 527 (50 mm/min)
Flexural strength	-	-	79.5 MPa	ISO 178
Flexural modulus	2100 MPa	ASTM D790	1990.0 MPa	ISO 178
Izod impact strength, notched (at 23°C)	95 J/m	ASTM D256	4.0 kJ/m ²	ISO 180
Charpy impact strength (at 23°C)	-	-	-	-
Hardness	108 (Rockwell)	ASTM D785	72 (Shore D)	Durometer

Thermal properties

Typical value

Test method

Melt mass-flow rate (MFR)	13.2 g/10min	ISO 1133 (240 °C, 2.16 kg)
Heat deflection (HDT) at 0.455 MPa	70 °C	ASTM D648
Heat deflection (HDT) at 1.82 MPa	62 °C	ASTM D648
Glass transition	~ 82 °C	DSC
Coefficient of thermal expansion	7·10 ⁻⁵ mm/mm °C	ASTM E693
Melting temperature	Not relevant (amorphous)	-
Thermal shrinkage	-	-

Other properties

Typical value

Test method

Specific gravity	1.27	ASTM D792
Flame classification	Not tested (typically HB when molded)	-

(*) See notes.

Technical data sheet Nylon

Ultimaker

Chemical name	Polyamide
Description	Used by many manufacturers worldwide, Nylon is well-known for its impressive durability, high strength-to-weight ratio, flexibility, low friction, and corrosion resistance. Seamless 3D printing experience due to the reduced humidity absorption when compared to other Nylon filaments.
Key features	Industrial-grade impact and abrasion resistance, durable, high strength-to-weight ratio, low friction coefficient, and good corrosion resistance to alkalis and organic chemicals.
Applications	Functional prototyping, tooling and industrial modeling.
Non-suitable for	Food contact and in-vivo applications. Applications where the printed part is exposed to temperatures higher than 80 °C

Filament specifications

	<u>Value</u>	<u>Method</u>
Diameter	2.85±0.05 mm	-
Max roundness deviation	0.05 mm	-
Net filament weight	750 g	-
Filament length	~103 m	-

Color information

	<u>Color</u>	<u>Color code</u>
	Nylon Transparent	n/a
	Nylon Black	RAL 9011

Mechanical properties (*)

Injection molding

3D printing

	<u>Typical value</u>	<u>Test method</u>	<u>Typical value</u>	<u>Test method</u>
Tensile modulus	-	-	579.0 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Tensile stress at yield	-	-	27.8 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Tensile stress at break	-	-	34.4 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at yield	-	-	20.0 %	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at break	-	-	210.0 %	ISO 527 (50 mm/min)
Flexural strength	-	-	24.0 MPa	ISO 178
Flexural modulus	-	-	463.5 MPa	ISO 178
Izod impact strength, notched (at 23°C)	-	-	34.4 kJ/m ²	ISO 180
Charpy impact strength (at 23°C)	-	-	-	-
Hardness	-	-	74 (Shore D)	Durometer

Thermal properties

Typical value

Test method

Melt mass-flow rate (MFR)	6.2 g/10min	ISO 1133 (250 °C, 1.2 kg)
Heat deflection (HDT) at 0.455 MPa	-	-
Heat deflection (HDT) at 1.82 MPa	-	-
Glass transition	50 °C	-
Coefficient of thermal expansion	-	-
Melting temperature	185 - 195 °C	ISO 11357 (20 °C/min)
Thermal shrinkage	12 ± 2 %	DIN 53866 (100 °C, 30 min)

Other properties

Typical value

Test method

Specific gravity	1.14	-
Flame classification	-	-

(*) Seen notes.

Technical data sheet PC

Ultimaker

Chemical name	Polycarbonate
Description	With Ultimaker PC filament, you can print strong and tough parts that retain dimensional stability when subjected to temperatures as high as 110 °C. Our PC is engineered to be printed at moderate temperatures compared to other PC filaments and shows minimized warping providing a seamless 3D printing experience.
Key features	High toughness (especially for the non-transparent filament options), temperature resistance, flame retardant characteristics, dimensionally stable, strong interlayer bonding (especially when using the front enclosure add-on), good bed adhesion (especially when using adhesion sheets). Allows printing of translucent parts with the transparent filament option.
Applications	Lighting, molds, engineering parts, tools, functional prototyping and short run manufacturing.
Non-suitable for	Food contact and in-vivo applications. Applications where the printed part is exposed to temperatures higher than 110 °C.

Filament specifications

	<u>Value</u>	<u>Method</u>
Diameter	2.85±0.05 mm	Ultra-fast CCS-based, dual-axis diameter gauge
Max roundness deviation	0.05 mm	Ultra-fast CCS-based, dual-axis diameter gauge
Net filament weight	750 g	-
Filament length	~99 m	-

Color information

	<u>Color</u>	<u>Color code</u>
	PCTransparent	n/a
	PC Black	RAL 9005
	PC White	RAL 9003

Mechanical properties (*)(**)

Injection molding

3D printing

	<u>Typical value</u>	<u>Test method</u>	<u>Typical value</u>	<u>Test method</u>
Tensile modulus	-	-	2134 MPa (t) 1904 MPa (b/w)	ISO 527 (1 mm/min)
Tensile stress at yield	-	-	-	-
Tensile stress at break	-	-	76.4 MPa (t) 53.7 MPa (b/w)	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at yield	-	-	-	-
Elongation at break	-	-	6.4 % (t) 5.9 % (b/w)	ISO 527 (50 mm/min)
Flexural strength	-	-	111.0 MPa (t) 95.5 MPa (b/w)	ISO 178
Flexural modulus	-	-	2410 MPa (t) 2310 MPa (b/w)	ISO 178
Izod impact strength, notched (at 23°C)	-	-	4.1 kJ/m ² (t) 14.9 kJ/m ² (b/w)	ISO 180
Charpy impact strength (at 23°C)	-	-	-	-
Hardness	-	-	82 (Shore D)(t) 80 (Shore D)(b/w)	Durometer

Thermal properties

Typical value

Test method

Melt mass-flow rate (MFR)	32 - 35 g/10 min (t) 23 - 26 g/10 min (b/w)	(300 °C, 1.2 kg)
Heat deflection (HDT) at 0.455 MPa	-	-
Heat deflection (HDT) at 1.82 MPa	-	-
Glass transition	112 - 113 °C	DSC, 10 °C/min
Coefficient of thermal expansion	-	-
Melting temperature	-	-
Thermal shrinkage	-	-

Other properties

Typical value

Test method

Specific gravity	1.18 -1.20	ASTM D792
Flame classification	preliminary tested*	-

(*) See notes.

(**) t: transparent. b/w: black/white.

Technical data sheet PLA

Ultimaker

Chemical name	Polylactic acid
Description	Ultimaker PLA filament provides a no-hassle 3D printing experience thanks to its reliability and good surface quality. Our PLA is made from organic and renewable sources. It's safe, easy to print with and it serves a wide range of applications for both novice and advanced users.
Key features	Good tensile strength and surface quality, easy to work with at high print speeds, user-friendly for both home and office environments, PLA allows the creation of high-resolution parts. There is a wide range of color options available.
Applications	Household tools, toys, educational projects, show objects, prototyping, architectural models, as well as lost casting methods to create metal parts.
Non-suitable for	Food contact and in-vivo applications. Long term outdoor usage or applications where the printed part is exposed to temperatures higher than 50 °C.

Filament specifications

	<u>Value</u>	<u>Method</u>
Diameter	2.85±0.10 mm	-
Max roundness deviation	0.10 mm	-
Net filament weight	350 g / 750 g	-
Filament length	~44 m / ~95 m	-

Color information

<u>Color</u>	<u>Color code</u>
PLA Green	RAL 6018
PLA Black	RAL 9005
PLA Silver Metallic	RAL 9006
PLA White	RAL 9010
PLA Transparent	n/a
PLA Orange	RAL 2008
PLA Blue	RAL 5002
PLA Magenta	RAL 4010
PLA Red	RAL 3020
PLA Yellow	RAL 1003
PLA Pearl White	RAL 1013

Mechanical properties (*)

Injection molding

3D printing

	<u>Typical value</u>	<u>Test method</u>	<u>Typical value</u>	<u>Test method</u>
Tensile modulus	-	-	2346.5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Tensile stress at yield	-	-	49.5 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Tensile stress at break	-	-	45.6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at yield	-	-	3.3 %	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at break	-	-	5.2 %	ISO 527 (50 mm/min)
Flexural strength	-	-	103.0 MPa	ISO 178
Flexural modulus	-	-	3150.0 MPa	ISO 178
Izod impact strength, notched (at 23°C)	-	-	5.1 kJ/m ²	ISO 180
Charpy impact strength (at 23°C)	-	-	-	-
Hardness	-	-	83 (Shore D)	Durometer

Thermal properties

Typical value

Test method

Melt mass-flow rate (MFR)	6.09 g/10min	ISO 1133 (210 °C, 2.16 kg)
Heat deflection (HDT) at 0.455 MPa	-	-
Heat deflection (HDT) at 1.82 MPa	-	-
Glass transition	~60 °C	ISO 11357
Coefficient of thermal expansion	-	-
Melting temperature	145-160 °C	ISO 11357
Thermal shrinkage	-	-

Other properties

Typical value

Test method

Specific gravity	1.24	ASTM D1505
Flame classification	-	-

(*) See notes.

Technical data sheet PP

Ultimaker

Chemical name	Polypropylene
Description	Ultimaker PP (polypropylene) is durable. It has high toughness, exceptional fatigue resistance, and low friction. It also has good chemical, temperature, and electrical resistance. PP is one of the most widely used plastics on the planet. From electrical components to living hinges, PP is the go-to material for prototyping and end-use products.
Key features	Durable with high toughness and fatigue resistance (PP retains its shape after torsion, bending, and/or flexing); low friction and smooth surfaces; good heat resistance (up to 105 °C); semi-flexible; chemical-resistant to a wide range of bases and acids, including industrial cleaning agents; high electrical resistance; very resistant to moisture; translucent; low density resulting in lightweight parts (high strength-to-weight ratio); excellent layer bonding; adequate bed adhesion and low warping when using adhesion sheets.
Applications	Functional prototypes, living hinges, connectors, lab equipment, moldings, stationery folders, packaging, storage boxes, protective covers, and light shades.
Non-suitable for	Food contact applications and in-vivo applications. Long term UV and/or moisture immersion and applications where the printed part is exposed to temperatures higher than 105 °C.

Filament specifications

	<u>Value</u>	<u>Method</u>
Diameter	2.85±0.05 mm	-
Max roundness deviation	-	-
Net filament weight	500 g	-
Filament length	~88 m	-

Color information

	<u>Color</u>	<u>Color code</u>
	Natural	n/a

Mechanical properties (*)

Injection molding

3D printing

	Typical value	Test method	Typical value	Test method
Tensile modulus	390 MPa	ISO 527	220 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Tensile stress at yield	14 MPa	ISO 527	8.7 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Tensile stress at break	No break within testing range	ISO 527	No break within testing range	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at yield	13 %	ISO 527	18 %	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at break	> 200 %	ISO 527	> 300 %	ISO 527 (50 mm/min)
Flexural strength	14 MPa	ISO 178	13 MPa	ISO 178
Flexural modulus	350 MPa	ISO 178	305 MPa	ISO 178
Izod impact strength, notched (at 23°C)	-	-	27.1 kJ/m ²	ISO 180
Charpy impact strength (at 0 °C)	10 kJ/m ²	ISO 179	-	-
Hardness	55 (Shore D)	ISO 868	45 (Shore D)	Durometer

Thermal properties

Typical value

Test method

Melt mass-flow rate (MFR)	20 g/10 min	ISO 1133 (230 °C, 2.16 kg)
Heat deflection (HDT) at 0.455 MPa	-	-
Heat deflection (HDT) at 1.82 MPa	-	-
Vicat softening temperature at 5N	115 °C	ISO 306
Glass transition	-	-
Coefficient of thermal expansion	-	-
Melting temperature	130 °C	DSC
Thermal shrinkage	-	-

Electrical properties

Typical value

Test method

Volume resistivity	> 10 ¹⁶ Ω·cm	(typical value)
Surface resistance	-	-

(*) See notes.

Technical data sheet PVA

Ultimaker

Chemical name	Polyvinyl alcohol
Description	PVA (polyvinyl alcohol) is a water soluble support material for multi-extrusion 3D printing. With a good thermal stability, Ultimaker PVA is ideal for printing complex models that require supports for large overhangs, deep internal cavities, and intricate geometries. Designed for a seamless 3D printing experience, our PVA provides good adhesion to both PLA and Nylon.
Key features	Good thermal stability resulting in better degradation resistance compared to other PVA filaments; less moisture sensitive than other PVA filaments; great adhesion to both PLA and Nylon; safe dissolution in tap water (no harmful chemicals required); biodegradable with no hazardous by-products.
Applications	Reliable 3D printing of water soluble support structures for PLA and Nylon build materials. PVA molds
Non-suitable for	Reliable 3D printing of water soluble support structures for ABS or CPE build materials

Filament specifications

	<u>Value</u>	<u>Method</u>
Diameter	2.85±0.10 mm	-
Max roundness deviation	0.10 mm	-
Net filament weight	350 g / 750 g	-
Filament length	~45 m / ~96 m	-

Color information

	<u>Color</u>	<u>Color code</u>
	Natural	n/a

Mechanical properties (*)

Injection molding

3D printing

	<u>Typical value</u>	<u>Test method</u>	<u>Typical value</u>	<u>Test method</u>
Tensile modulus	3860 MPa	ISO 527 (1 mm/min)	-	-
Tensile stress at yield	-	-	-	-
Tensile stress at break	78 MPa	ISO 527 (50 mm/min)	-	-
Elongation at yield	-	-	-	-
Elongation at break	9.90 %	ISO 527 (50 mm/min)	-	-
Flexural strength	-	-	-	-
Flexural modulus	-	-	-	-
Izod impact strength, notched (at 23°C)	-	-	-	-
Charpy impact strength, unnotched (at 23°C)	1.6 kJ/m ²	ISO 179	-	-
Hardness	-	-	-	-

Thermal properties

Typical value

Test method

Melt mass-flow rate (MFR)	17-21 g/10 min	(190 °C, 21.6 kg)
Heat deflection (HDT) at 0.455 MPa	-	-
Heat deflection (HDT) at 1.82 MPa	-	-
Vicat softening temperature at 10N	60.2 °C	ISO 306
Glass transition	-	-
Coefficient of thermal expansion	-	-
Melting temperature	163 °C	ISO 11357
Thermal shrinkage	-	-

Other properties

Typical value

Test method

Specific gravity	1.23	ASTM D1505
Flame classification	-	-

(*) See notes.

Technical data sheet TPU 95A

Ultimaker

Chemical name	Thermoplastic polyurethane
Description	Highly versatile for industrial applications, TPU 95A filament is the go-to choice for a wide array of manufacturing projects that demand the qualities of both rubber and plastic. Designed for 3D printing consistency, TPU 95A is a semi-flexible and chemical resistant filament with strong layer bonding. In addition, it is easier and faster to print than other TPU filaments.
Key features	Exceptional wear and tear resistance, high impact strength, Shore-A hardness of 95, up to 580% elongation at break, and good corrosion resistance to many common industrial oils and chemicals.
Applications	Functional prototyping, grips, guides, hinges, sleeves, snap-fit parts and protective cases.
Non-suitable for	Food contact applications and in-vivo applications. Long term UV and/or moisture immersion and applications where the printed part is exposed to temperatures higher than 100 °C.

Filament specifications

	<u>Value</u>	<u>Method</u>
Diameter	2.90±0.13 mm	2-axis laser gauge
Max roundness deviation	0.07 mm	2-axis laser gauge
Net filament weight	750 g	-
Filament length	~96 m	-

Color information

<u>Color</u>	<u>Color code</u>
TPU 95A White	RAL 9010
TPU 95A Black	RAL 9005
TPU 95A Red	RAL 3031
TPU 95A Blue	RAL 5002

Mechanical properties (*)

Injection molding

3D printing

	<u>Typical value</u>	<u>Test method</u>	<u>Typical value</u>	<u>Test method</u>
Tensile modulus	-	-	26.0 MPa	ASTM D638
Tensile stress at yield	-	-	8.6 MPa	ASTM D638
Tensile stress at break	-	-	39.0 MPa	ASTM D638
Elongation at yield	-	-	55.0 %	ASTM D638
Elongation at break	-	-	580.0 %	ASTM D638
Flexural strength	-	-	4.3 MPa	ISO 179
Flexural modulus	-	-	78.7 MPa	ISO 179
Izod impact strength, notched (at 23°C)	-	-	34.4 kJ/m ²	ISO 180
Charpy impact strength (at 23°C)	-	-	-	-
Hardness	-	-	95 (Shore A) 46 (Shore D)	ASTM D2240 Durometer
Abrasion resistance	-	-	0.06 g	ASTM D4060 (mass loss, 10000 cycles)

Thermal properties

Typical value

Test method

Melt mass-flow rate (MFR)	15.9 g/10min	ISO 1133 (225 °C, 1.2 kg)
Heat deflection (HDT) at 0.455 MPa	74 °C	ASTM D648
Heat deflection (HDT) at 1.82 MPa	49 °C	ASTM D648
Glass transition	-24 °C	DSC
Coefficient of thermal expansion	100·10 ⁻⁶ °C ⁻¹	ASTM E693
Melting temperature	220 °C	DSC
Thermal shrinkage	-	-

Electrical properties

Typical value

Test method

Volume resistivity	10 ¹¹ Ω·m	IEC 60093
Surface resistance	2·10 ¹⁴ Ω	IEC 60093

(*) See notes.

A.3 Fiche technique de l'Argex Pompmix S



ARGEX POMPMIX

BETON ARGEX POMPABLE

Pompmix S 'structurel'

LC 30/33 - D 1.8

LC 35/38 - D 1.8

LC 40/44 - D 2.0



Pompmix L 'légér'

LC 12/13 - D 1.4

LC 20/22 - D 1.6



support technique :
+32 3 250 15 15

COMPOSITIONS ET RECOMMANDATIONS

1. Compositions

	Pompmix L LC 12/13 - D1.4		Pompmix L LC 20/22 - D 1.6		Pompmix S LC 30/33 à LC 35/38 - D1.8		Pompmix S LC 40/44 - D 2.0	
	absolu (L)	en vrac (L)	absolu (L)	en vrac (L)	absolu (L)	en vrac (L)	absolu (L)	en vrac (L)
CEM III/A 62,5 N LA	113	400	129	400	129	400	129	400
Cendres Volantes (ou filler calcaire)	(71)	150 (192)	(48)	100 (130)	(48)	100 (130)	(48)	100 (130)
Argex AR 0/4 - 650	620	592 (1)	483	473 (1)	322	560	560	560
Argex AM 0/8 - 650								
Argex AM 0/8 - 750								
Sable 0/1 ou 0/2								
Sable 0/4								
Eau totale								
Superplastifiant								
Viscosant (4)								
Air	20		20		20		20	
Total	1440	1672	1010	1963	1005	2036	1004	1004

(1) Dans ces exemples, le poids humide de l'ARGEX est calculé avec une humidité de 30% (après contrôle de l'humidité et de la masse volumique sèche des granulats)
 (2) Indicatif - à confirmer avec une simulation granulométrique des sables
 (3) Indicatif - à confirmer par des essais béton préliminaires
 (4) dosage à base d'adjuvant liquide - en cas de poudre (aussi utilisé pour du béton colloïdal) prévoir 0,8 à 1 kg/m³

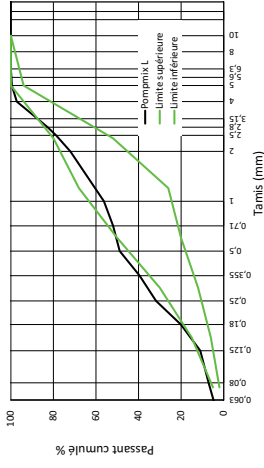
E/C maximum	0,57	0,50	0,50	0,50
E/(C+Kf) Max (ex. k = 0,2)	0,53	0,48	0,48	0,48

Slumpflow visé : 60-70 cm
 l'eau dans les granulats ARGEX (ex. humidité de 30%) n'intervient pas dans le rapport E/C efficace comme eau libre

2. Granulométrie des granulats

Celle-ci est optimisée pour le pompage de chaque Pompmix et rentrera dans un fuseau établi. Pour ce faire, il est nécessaire de suivre les compositions Pompmix et d'adapter les % de sable fin et gros - selon leur granulométrie propre - tout en respectant le total de 810 kg/m³ de sable pour le Pompmix S ou de 400 kg/m³ pour le Pompmix L LC20/22 D1.6. Il est recommandé pour le pompage de se coller au maximum à limite supérieure du fuseau pour augmenter les fines! Cette simulation est prévue sur demande par notre service technique.

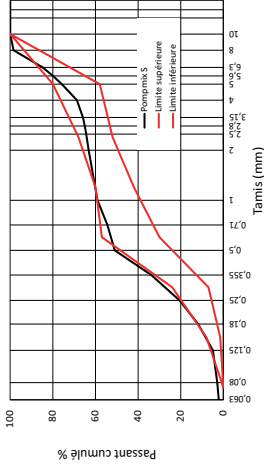
Pompmix L:



Dans le cas du LC 12/13 - D1.4, les fines proviennent directement de l'argex AR0/4-650, ainsi que du ciment et cendres volantes (ou filler calcaire) en terme d'ultra-fines. Pour le LC 20/22 - D1.6, la quantité de fines est complétée par le rajout de sable ordinaire (400 kg/m³ total) dont la proportion de sable fin (0/1 ou 0/2) et de sable gros (0/4) est optimisée par une simulation requise.

Quantité minimum requis de fines et d'ultra-fines (Ciment/Filler/Sable) : 550-600 kg/m³ < 0.250 mm.

Pompmix S:



Pour optimiser la granulométrie du Pompmix S, on adapte dans chaque cas la proportion de sable fin (0/1 ou 0/2) et de sable gros (0/4) en tenant compte de leur granulométrie respective sur base d'une simulation requise tout en maintenant un total de 810 kg/m³.

Quantité minimum requis de fines et d'ultra-fines (Ciment/Filler/Sable) : 600 kg/m³ < 0.250 mm.

3. Humidité et dosage des granulats Argex

Humidité

Pour le pompage, un degré d'humidité minimum de 30% est requis! Pour ce faire, les recommandations sont:

- ✓ Commander l'Argex du stock au minimum 2 semaines avant le pompage.
- ✓ Soit arroser avant le pompage de façon intensive et continue le stock Argex au minimum 1 semaine (en le malaxant régulièrement au bulldozer) ou soit immerger les granulats (1 semaine) - voir graphique. Stopper l'arrosage 12h avant le pompage pour diminuer la quantité d'eau autour du granulat (eau libre!).
- ✓ Contrôler régulièrement l'humidité de l'Argex (échantillon représentatif du stock - EN 93:2.1 / 2 - ex. minimum 10 emplacements différents et minimum 40 cm de profondeur) à l'échelle 105 (EN 1097-5).

Dosage

Comme la plupart des centrales dosent en poids les granulats, il est recommandé de contrôler la masse volumique sèche et l'humidité de l'Argex pour convertir le volume apparent de la composition en poids humide exact. Un document résumant cette procédure pour le dosage peut être transmis sur demande par le service labo.

Malaxage du béton

- ✓ Doser l'Argex (en poids humide) et l'introduire avec tous les autres constituants dans le malaxeur et charger le camion-mixer (processus classique).
- ✓ Une autre méthode consiste à charger séparément l'Argex (selon dosage volumétrique) directement dans le camion-mixer par une bande transporteuse ou trémie et ensuite la pâte (sable, ciment, cendre volante etc.). Ceci nécessite un malaxage de minimum 1/2 heure! Méthode à confirmer avec le labo Argex.

4. Consistance béton frais

Les dosages d'adjuvants et d'eau (E/C Max.) sont proposés pour une ouvrabilité importante afin de faciliter le pompage. Celle-ci est surtout dépendante des longueurs de tuyaux et du type de pompe. On mesurera surtout le Slump-flow avant le pompage pour vérifier que le Slump-flow nécessaire de 60 à 70 cm est réalisé. Pendant le pompage, la fluidité peut être réduite (en général la perte d'ouvrabilité avant et après le pompage: 4 à 8 cm)!

Evitez les temps d'attente avec le béton dans le bac de la pompe. Solution pour éviter le rajout d'eau ou fluidifiant sur chantier : ajouter 0.1% de retardateur/m³ (à confirmer par le fournisseur du retardateur).

5. Divers

- ✓ Les classes de résistance compression et de densité sont établies sur base d'un Slump-flow de minimum 65 cm avant pompage.
- ✓ Une pompe rotor ou à piston peuvent être utilisées (selon distances pompage, etc.).
- ✓ Eviter au maximum les réductions de diamètre entre les tuyaux ou connections.
- ✓ Les vibrations adaptées sont nécessaires pour la mise en œuvre du Pompmix (basse fréquence, etc.).

CAHIER DES CHARGES

1. Spécifications générales et exigences

La préparation, la spécification et les caractéristiques du béton ainsi que le contrôle de la production doivent satisfaire aux exigences et aux directives de la norme EN 206-1 et aux annexes nationales (NBN B 15-001,...).

2. Spécifications particulières

	exigences							
	A	B		C	D	E1	E2	E3
		B1	B2					
Argex Pompmix S D 1.8	LC 30/33				8			
Argex Pompmix S D 1.8	LC 35/38				8			
Argex Pompmix S D 2.0	LC 40/44				8			
Argex Pompmix L D 1.4	LC 12/13				4			
Argex Pompmix L D 1.6	LC 20/22				4			

A: classe de résistance compression (selon EN 206-1)

B: exigences de durabilité avec B1 (domaine d'utilisation) et B2 (classe d'environnement) :

B1: domaine d'utilisation: BNA= béton non armé (chlorures $\leq 1,0\%$), BA= béton armé (chlorures $\leq 0,4\%$)

B2: classe d'environnement: les classes d'environnement de la norme EN 206-1 et Annexes Nationales sont d'application pour l'Argex Pompmix. Cependant, cette application au béton léger ne se limite qu'aux paramètres suivants: le dosage de ciment minimum, le rapport maximum E/C et la composition. L'approche classe de résistance compression minimum n'est pas d'application pour ce béton.

B3: durabilité: conformément à EN 1992-1-1, les classes d'environnement sont d'applications (voir B2) et l'enrobage des armatures sera augmenté de 5 mm. Les caractéristiques mécaniques complémentaires (module d'élasticité, retrait, fluage, etc.) seront soit calculées selon EN 1991-1-1, soit mesurées en laboratoire.

C: classe de consistance: pour les Pompmix Argex, on se rapportera uniquement à la mesure du Slump-flow (EN 12350-8) - voir E1

D: dimension nominale maximale des granulats (D max)

E1: Slump-flow: les caractéristiques de résistance compression et de masse volumique des Pompmix Argex sont établies sur base d'un Slump-flow de minimum 65 cm avant pompage. Le Slump-flow variera de 60 à 70 cm avant pompage sur chantier selon les longueurs de tuyaux.

E2: composition: chaque type de Pompmix Argex (1 à 5) correspond à une composition précise - voir tableau Compositions en page 2.

E3: rapport E/C efficace: l'eau absorbée par les granulats légers n'est pas considérée; toute addition de type cendres volantes (voir E2) sera pris en compte dans le E/C efficace conformément aux normes précitées - voir E/C Maximum dans le tableau Compositions en page 2.

REFERENCE NORMATIVE

ARGEX granulats : ARO/4-650, AM4/8-650 en AM4/8-750 : fiche technique CE - disponible via web ou sur demande - conformément EN 13055-1

ARGEX béton :

- EN 206-1 : Béton - Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité
- NBN B 15-001 : Béton - Spécification, performances, production et conformité
- EN 1992-1-1 : Eurocode 2: Calcul des structures en béton - Partie 1-1: Règles générales et règles pour les bâtiments
- EN 13670 : Exécution des structures en béton

Essais sur béton frais : EN 12350-1 à -12 & ASTM C 173 «Méthode d'essai pour la détermination de l'air entraîné du béton frais par méthode volumétrique»

Essais sur béton durci : EN 12390-1 à -7 & Essai de résistance à la ségrégation "EUROLIGHTCON BE96-3942/R21, juni 2000"



EN 13055-1

0965-CPD-GT0525



Les informations techniques dans cette fiche sont données à titre indicatif et ne peuvent être considérées comme contractuelles.

juin 2011

A.4 Compositions de béton

Composition béton 1

Date : 16/03/2017

Type de boc : Drick LP + Cube (20 cm côté)

Matériau	Qté prévue	Qté réelle	Remarques
Argex	1 kg	1 kg	
Argex concassé	2,25 kg	2,25 kg	Concasseuse 5/10
Ciment	2,5 kg	2,5 kg	
Eau	3 L	3 L	Trop d'eau
Frigolite	5 L	5 L	
Plastifiant			
Super plastifiant			
Entraineur d'air	11 mL	11 mL	
Accélérateur	25 mL	25 mL	

Densité	
Remarques	

Composition béton 2

Date : 20/03/2017

Type de boc : Pyramide + demi cube (20 cm côté)

Matériau	Qté prévue	Qté réelle	Remarques
Argex	1 kg	1 kg	
Argex concassé	3 kg	3 kg	Concasseuse 5/10
Ciment	2,5 kg	2,5 kg	
Eau	2 L	2 L	Trop d'eau
Frigolite	4 L	4 L	
Plastifiant			
Super plastifiant	10 mL		
Entraineur d'air	11 mL	11 mL	
Accélérateur	25 mL	25 mL	
Béton léger	10 mL	10 mL	

Densité	
Remarques	Vibré à l'aiguille vibrante => Argex et frigolite remontent Mauvais état de surface

Composition béton 3

Date : 22/03/2017

Type de boc : Drick LP + Cube (20 cm de côté)

Matériau	Qté prévue	Qté réelle	Remarques
Argex	5 kg	5 kg	
Argex concassé	8 kg	8 kg	Concasseuse 5/10
Ciment	8 kg	8 kg	
Eau	5 L	5 L	
Frigolite			
Plastifiant			
Super plastifiant	20 mL		
Entraineur d'air	20 mL	20 mL	
Accélérateur	20 mL	20 mL	
Béton léger	20 mL	20 mL	

Densité	+/- 1400 kN/m ³
Remarques	Bon si bien vibré mais Argex remonte Un peu trop liquide, diminuer un peu la quantité d'eau Léger, on peut se permettre de rajouter du béton

Composition béton 4

Date : 05/04/2017

Type de boc : Drick LP + Cube (20 cm côté)

Matériau	Qté prévue	Qté réelle	Remarques
Argex	5 kg	5 kg	
Argex concassé	8 kg	8 kg	Concasseuse 5/10
Ciment	9 kg	9 kg	
Eau	5 L	5 L	Trop d'eau
Frigolite		0	
Plastifiant			
Super plastifiant	20 mL	20 mL	
Entraineur d'air	20 mL	20 mL	
Accélérateur	20 mL	20 mL	
Béton léger	20 mL	20 mL	

Densité	+/- 1500 kN/m ³
Remarques	Bon si bien vibré mais Argex remonte Un peu trop liquide

Composition béton 5

Date : 21/04/2017

Type de boc : Drick LP + Cube (20 cm côté)

Matériau	Qté prévue	Qté réelle	Remarques
Argex	5 kg	5 kg	
Argex concassé	8 kg	8 kg	Concasseuse 5/10
Ciment	9 kg	9 kg	
Eau	4,5 L	4,5 L	Trop d'eau
Frigolite			
Plastifiant			
Super plastifiant	20 mL	20 mL	
Entraineur d'air	20 mL	20 mL	
Accélérateur	20 mL	20 mL	
Béton léger	20mL	20mL	

Densité	+/- 1500 kN/m ³
Remarques	Bon si bien vibré mais Argex remonte Un peu trop liquide

A.5 Essais de compression

Synthèse des essais

Type	Composition	Largeur [m]	Longueur [m]	Surface [m ²]	Volume [m ³]	Charge maximale [T]	Masse de l'élément [kg]	Densité [kg/m ³]	Date de fabrication	Date d'essai	Résistance [Mpa]	Nombre de jours [j]
Cube	3	0,1	0,2	0,02	0,004	25,9	5,43	1357,5	05/03/2017	02/08/2017	12,70395	150
Cube	3	0,145	0,2	0,029	0,0058	32,2	6,93	1194,82759	04/03/2017	20/06/2017	10,8924828	108
Cube	4	0,148	0,2	0,0296	0,00592	26,8	6,57	1109,7973	05/04/2017	02/08/2017	8,88202703	119
Drick 60	5	0,4	0,02	0,008	0,01007168	2	12,85	1275,85495	04/05/2017	22/06/2017	2,4525	49
Cube	5	0,14	0,2	0,028	0,0056	43,2	7,6	1357,14286	04/05/2017	20/06/2017	15,1354286	47
Cube	5	0,15	0,2	0,03	0,006	48	7,75	1291,66667	21/05/2017	01/08/2017	15,696	72
Cube	5	0,159	0,2	0,0318	0,00636	31	7,37	1158,80503	16/05/2017	02/08/2017	9,56320755	78
Cube	5	0,165	0,2	0,033	0,0066	46,2	8,52	1290,90909	11/05/2017	01/08/2017	13,734	82
Cube	5	0,165	0,2	0,033	0,0066	50	8,48	1284,84848	10/05/2017	02/08/2017	14,8636364	84
Cube	5	0,188	0,2	0,0376	0,00752	45,2	9,733	1294,28191	08/05/2017	02/08/2017	11,7928723	86

A.6 Plans des Cônes

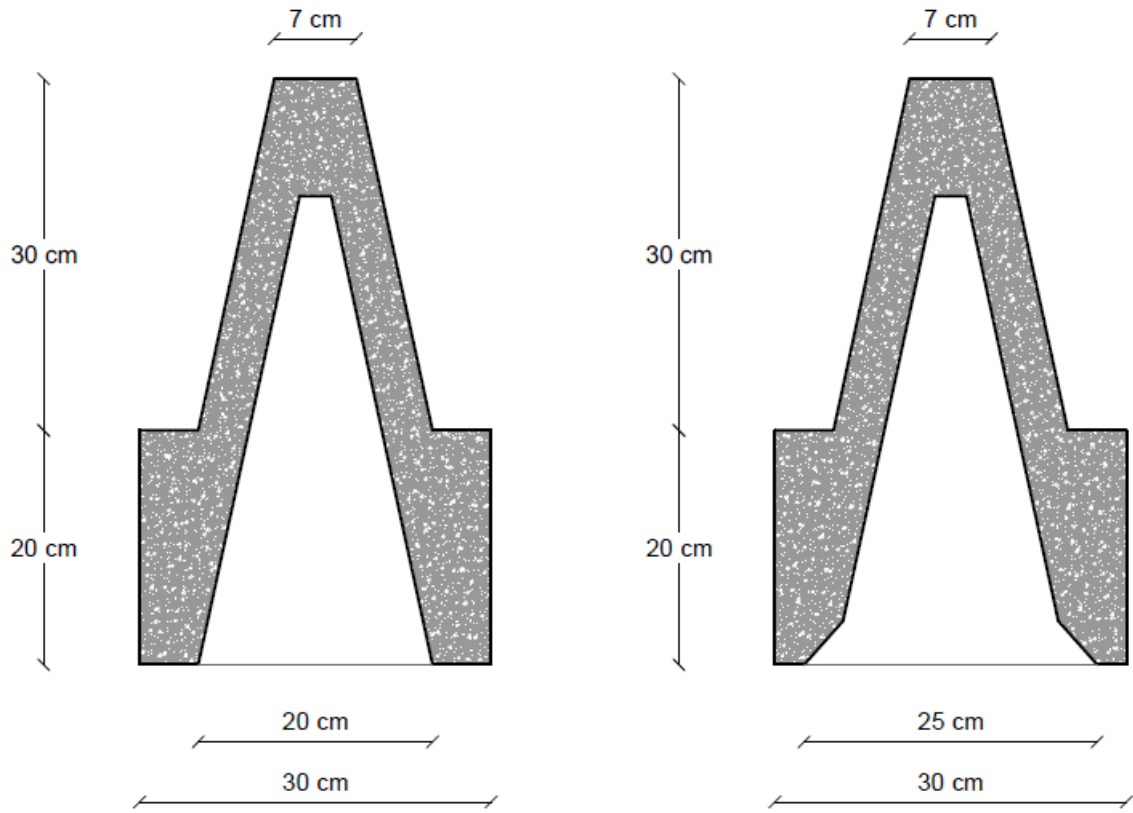


FIGURE A.1 – Dimensions du cône

A.7 Plans des Blocs coniques

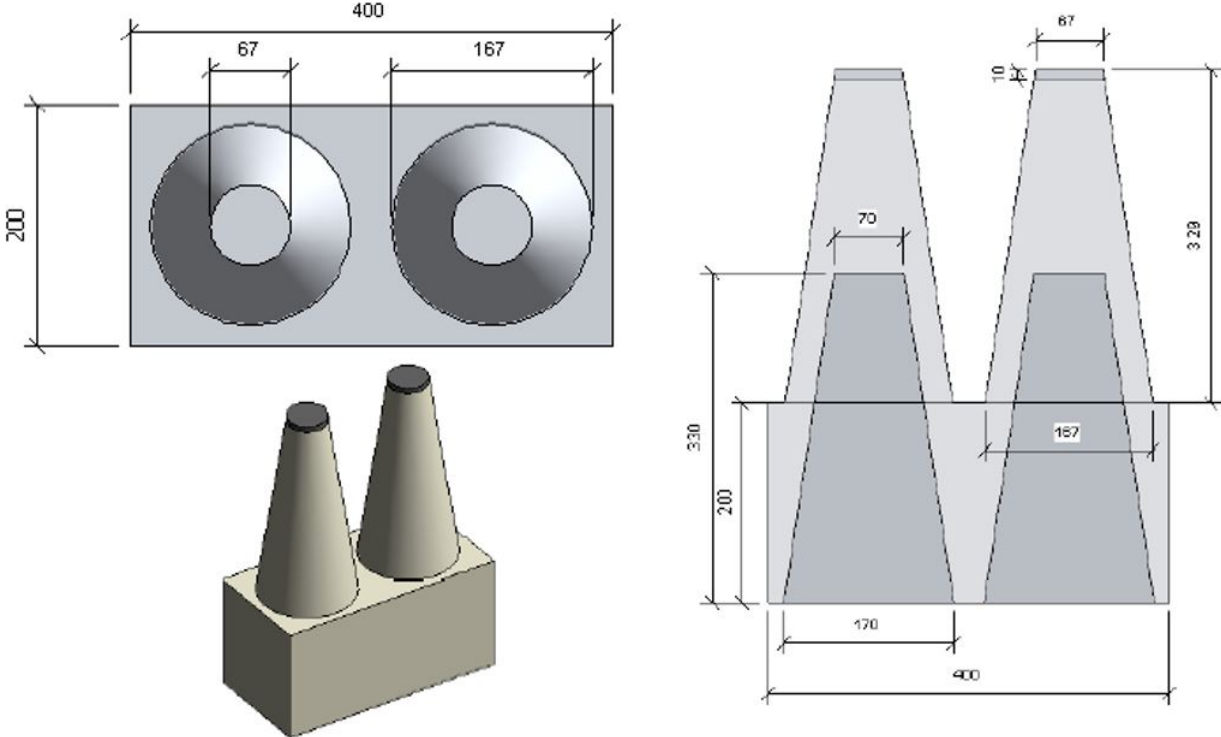
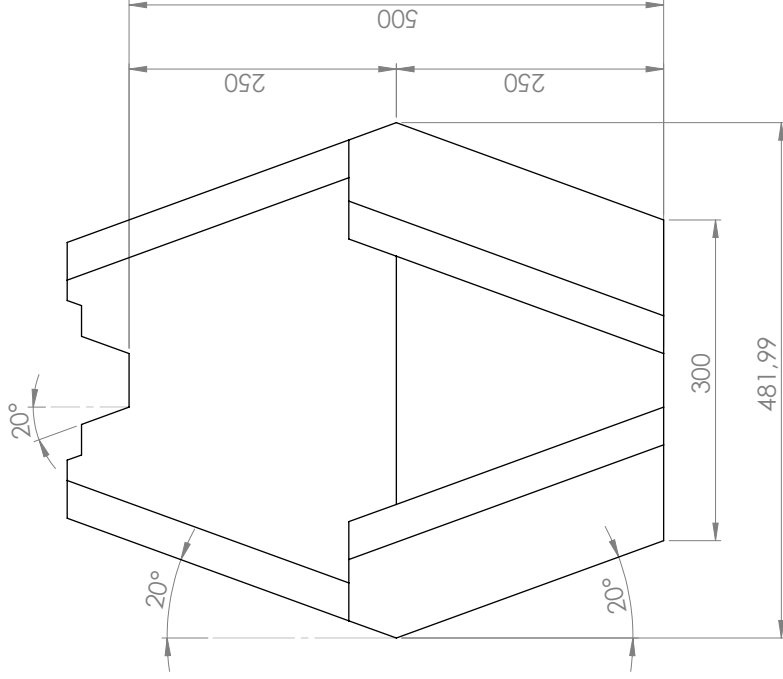
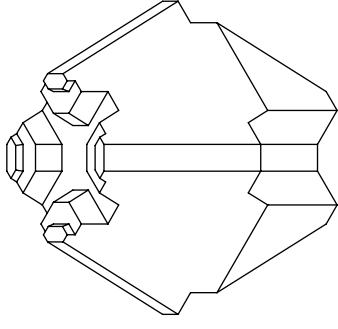
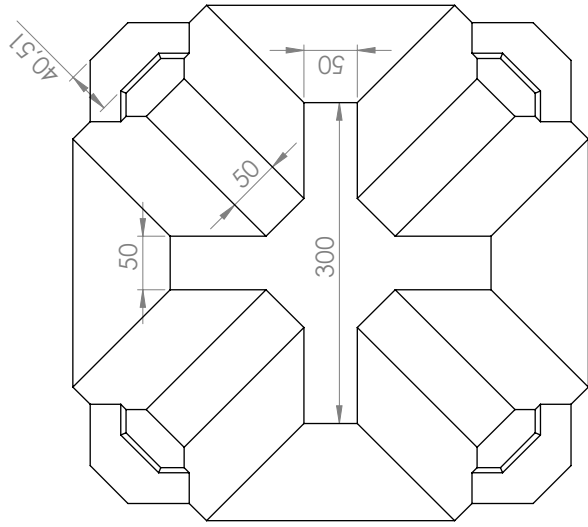
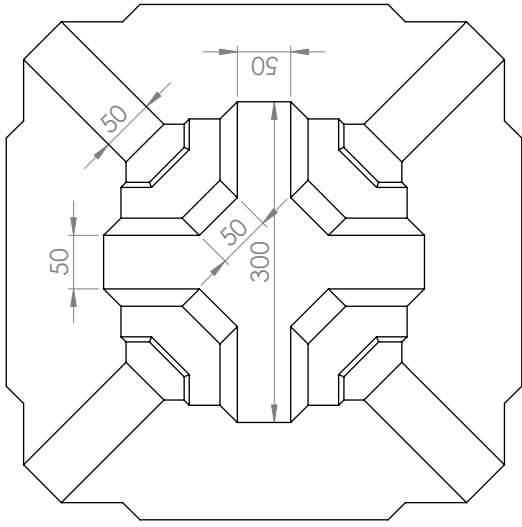


FIGURE A.2 – Dimensions des Blocs coniques

A.8 Plans des Droxels

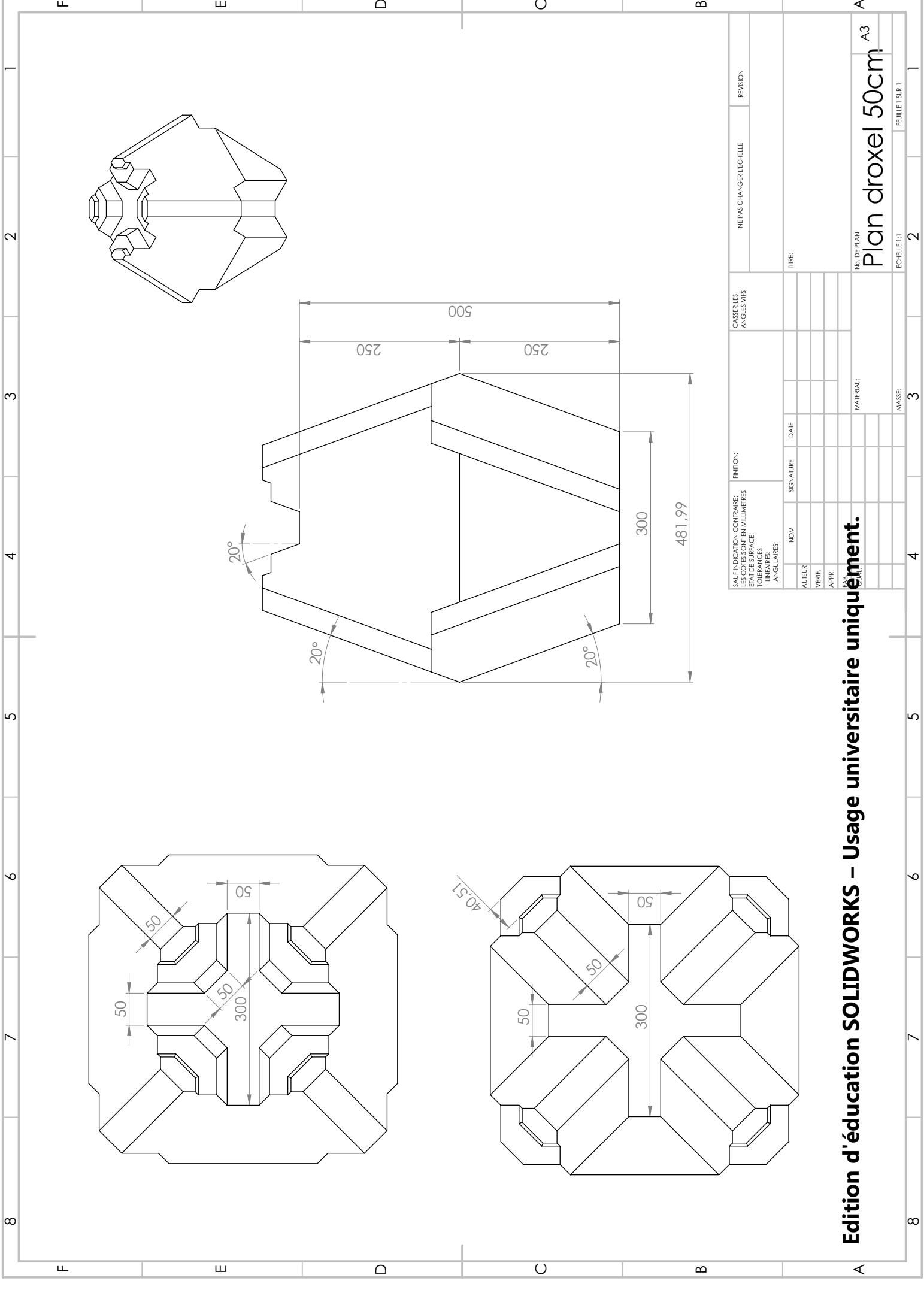


SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
ETAT DE SURFACE:									
TOLERANCES:									
LINEAIRES:									
ANGULAIRES:									
AUTEUR	NOM	SIGNATURE	DATE	TITRE:					
VERIF.									
APPR.									
MAT.									
MATERIAL									

Edition d'éducation SOLIDWORKS – Usage universaire uniquement.

No. DE PLAN
Plan d'roxeel 50cm
A3

ECHELLE: 1:1
FEUILLE 1 SUR 1



A.9 Plans des Blocs pyramidaux

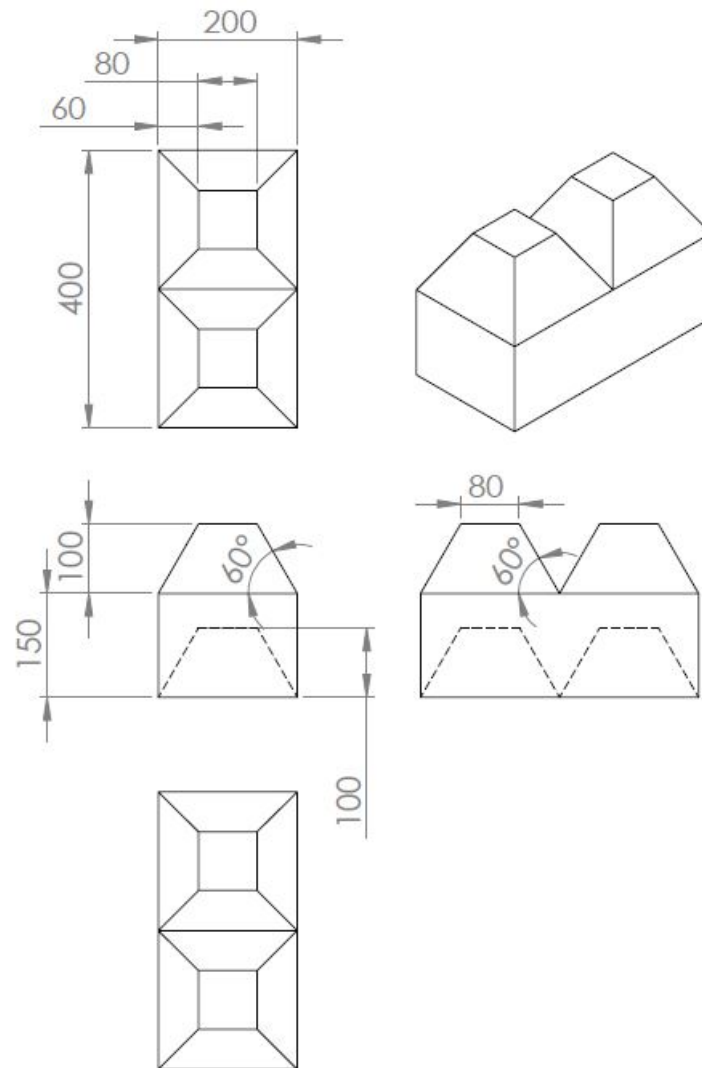


FIGURE A.3 – Dimensions des Blocs pyramidaux

A.10 Plans des Blocs Mâle-Femelle

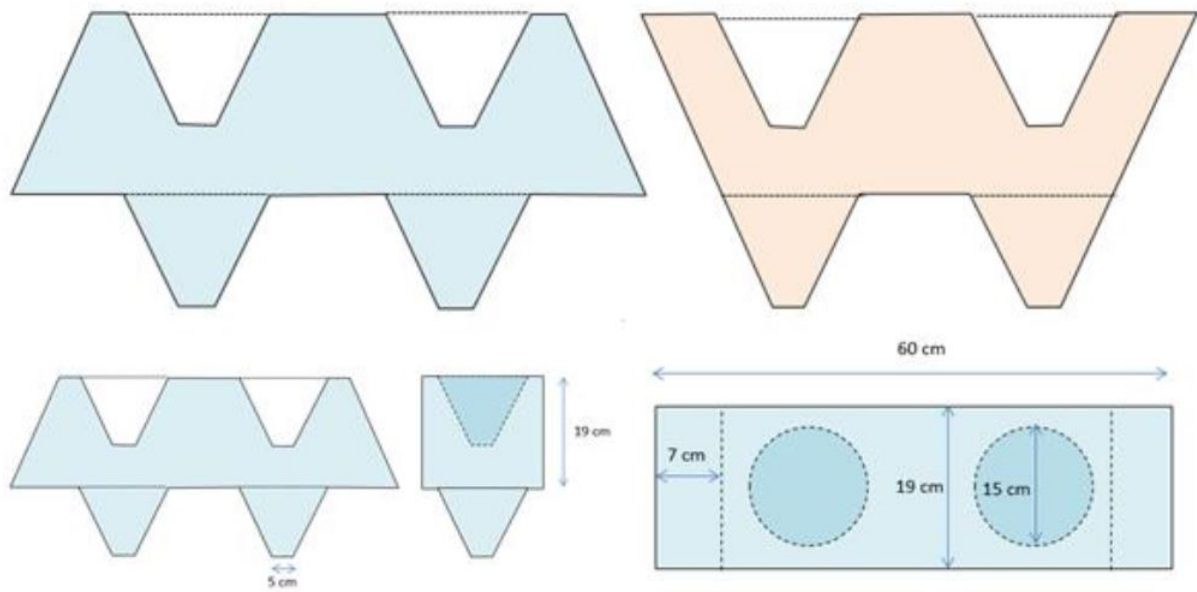
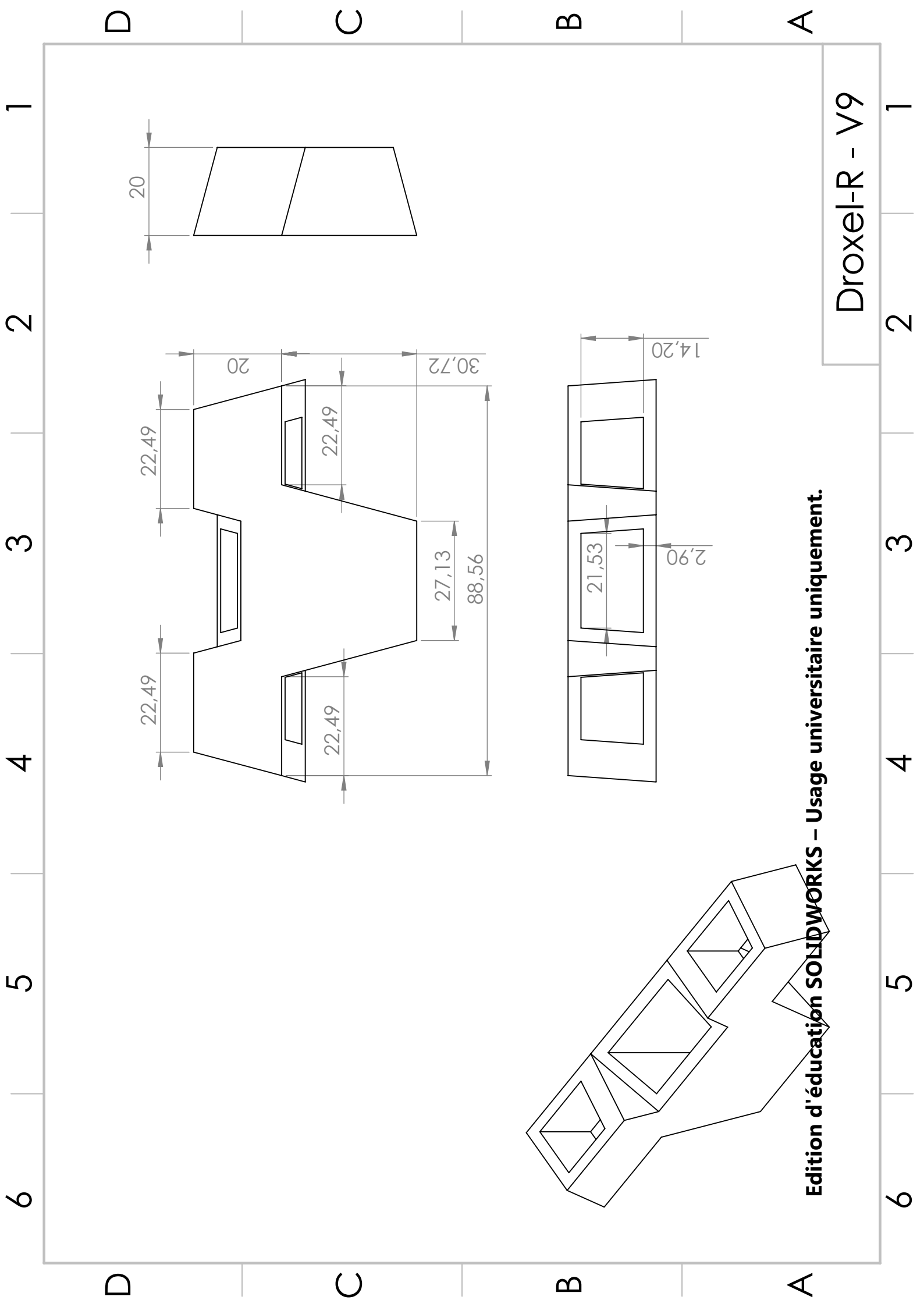


FIGURE A.4 – Dimensions des Blocs Mâle-Femelle

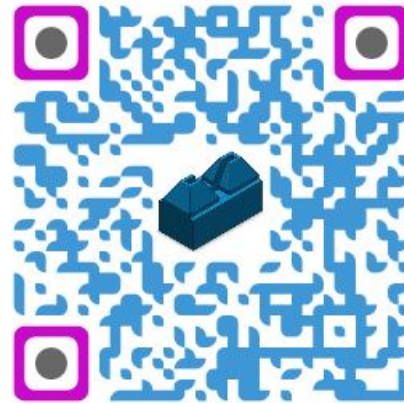
A.11 Plans des Droxels-R



A.12 Liens vidéos première partie



Système de pose



Mise en place des Dricks



Glissement



Mise en place d'un mur

FIGURE A.5 – QR codes dirigeant vers les vidéos illustrant les comportements des Dricks LP

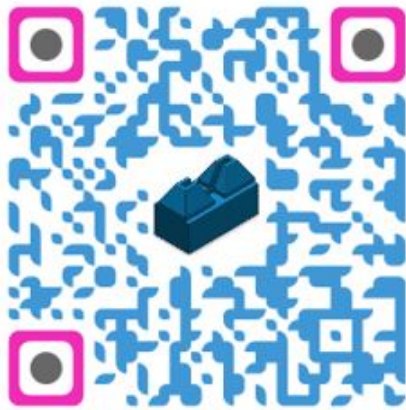
Système de pose : <https://www.youtube.com/watch?v=GEZffajLSqU>

Mise en place des Dricks : <https://www.youtube.com/watch?v=cr5MZoIbj3M>

Glissement : <https://www.youtube.com/watch?v=h5iQ106aDII>

Mise en place d'un mur : <https://www.youtube.com/watch?v=kGtkOmuYers>

A.13 Liens vidéos seconde partie



Système de moulage



Essai du 17/08/2017



Essai du 19/05/2017
Première partie



Essai du 19/05/2017
Deuxième partie

FIGURE A.6 – QR codes dirigeant vers notre proposition de moulage industriel

Système de moulage : <https://www.youtube.com/watch?v=zv-sy-kjhFY>

Essai du 17/08/2017 : <https://www.youtube.com/watch?v=tG3GzfSKUDE>

Essai du 19/05/2017 - Première partie : <https://www.youtube.com/watch?v=Ubsx3xuavpo>

Essai du 19/05/2017 - Deuxième partie : <https://www.youtube.com/watch?v=Ubsx3xuavpo>

