

Clément GOSSELIN

Mon travail porte sur l'impression 3D multi matériaux à grande échelle. Aujourd'hui de nombreuses techniques d'impression 3D voient le jour. Tandis que la taille, la complexité des formes fabriquées ainsi que la diversité des matériaux imprimés ne cesse de croître, les premiers bâtiments imprimés commencent à sortir de terre.

Quels enjeux pour l'architecture, quel changement dans les méthodes de conception, quelles outils d'aide à la conception pour utiliser tout le potentiel de l'impression 3D multi matériaux ? L'impression 3D permettait-elle la réalisation d'une architecture non standard ? L'impression 3D multi matériaux et la performance orientée ?

Historique de l'impression 3D

Aujourd'hui, de nombreux procédés d'impression 3D voient le jour. Maintenant, la plupart des matériaux peuvent être imprimés : Cellules organiques, métaux, plastiques, céramiques...

Le terme technique d'impression 3D est fabrication additive. Cette méthode consiste à mettre en forme un objet par l'ajout de couches successives de matière. Par opposition à la fabrication soustractive, qui consiste à mettre en forme un objet par enlèvement de matière, tel que le fraisage.

Il s'agit cependant de méthodes de fabrication assez récente dans le milieu de l'industrie, et qui ont vu le jour dans les années 80. En effet, en 1984, Carl Deckard et Joe Beaman déposent le premier brevet pour une machine de stéréolithographie. Il s'agit de la première machine servant à réaliser des objets tridimensionnels par ajout de strates successives.

Cette invention découle de plusieurs recherches. En effet, dès les années 50 des chercheurs s'intéressent à la fabrication couche par couche. Il ne s'agit pas alors de fabriquer des objets par le biais de cette méthode, mais plutôt d'en démontrer les intérêts (Compacité des objets produits, plus grande liberté géométrique, production d'objets pré-assemblés, production de mécanismes fonctionnels...). Par ailleurs, dans les années 60, plusieurs chercheurs s'intéressent à des méthodes de polymérisation de résine par double rayon lumineux. Cette dernière permet de faire polymériser un point précis dans un bain de résine. C'est cette technique qui est utilisée par la machine à stéréolithographie de Deckard et Beaman.

Les premières machines de fabrication additive sont commercialisées en 1987. Elles sont à cette époque destinées à des industriels pour la réalisation de prototypes. Elles permettent de réaliser à moindre coût de nombreux tests avant de passer à une production en série, et ce, quel que soit la complexité de la pièce à réaliser. En effet, cette technique était alors essentiellement utilisée car elle permettait de faire l'économie du moule.

En 1990, la fabrication additive commence à être utilisée pour la réalisation de moules. En effet, il existe de nombreuses machines d'impression 3D orientées vers la production de moules, qui servent principalement à la réalisation de pièces de fonderie, tels que les imprimantes à plâtre et à sable.

Le terme « imprimante 3D » voit le jour en 1996. Avant on parlait de stéréolithographie ou de fabrication additive.

En 2000, la fabrication additive commence à être utilisée pour la réalisation de pièces fonctionnelles. La plupart de ces dernières sont alors utilisées pour la fabrication de pièces mécaniques complexes (aéronautique, satellite, voiture de course...) ou dans le domaine médical (organes fonctionnels, prothèses en titane...), la joaillerie.

Les différentes méthodes d'impression 3D

Il existe deux grandes catégories d'imprimante 3D : Les imprimantes à dépôt sélectif et les imprimantes à solidification sélective.

Le premier type regroupe toutes les techniques d'extrusion, telle que la FDM (fused deposition modeling), de jet et de spray. Il s'agit alors de déposer la quantité de matière dont on a besoin au bon endroit. Le deuxième regroupe toutes les techniques de solidification par chauffe ou ajout d'un liant, tel que le frittage de poudre et stéréolithographie : de la matière sous forme de liquide ou de poudre remplit l'intégralité du bac. Il s'agit alors de solidifier couche par couche les zones constituant l'objet.

Chacune de ces méthodes a ses avantages et ses inconvénients :

- Le dépôt sélectif est moins précis que la solidification sélective (surtout concernant les méthodes d'extrusion).
- Le dépôt sélectif permet de réaliser une impression multi matériaux.
- La question des supports durant la phase d'impression se pose davantage concernant la méthode de dépôt sélectif car il n'y a pas de matière autour pour la maintenir.
- La question de la trajectoire de l'outil se pose d'avantage concernant le dépôt sélectif, du moins concernant les méthodes d'extrusion. En effet, concernant ces dernières, les propriétés au sein du cordon de dépôt sont différentes des propriétés entre cordons (il y a une rupture plus ou moins marquée à l'interface des cordons).

Concernant l'évolution de la fabrication additive, nous pouvons constater deux choses :

- une augmentation de la taille des objets imprimés.
- l'apparition et le développement des impressions multi matériaux. Ces dernières permettent de mettre en œuvre, lors d'une seule impression, des matériaux possédant des propriétés très différentes (flexibilité, transparence, opacité...) et ainsi de créer des matériaux gradués.

L'échelle architecturale

La taille des objets réalisables par une machine d'impression 3D est intrinsèquement liée à la résolution de cette dernière. En effet, il est difficile de réaliser des objets de grande dimension possédant une résolution fine car le temps d'impression nécessaire serait trop important.

A petite échelle (entre 5 et 50 cm), tout peut être imprimé (pour ainsi dire n'importe quelle forme et n'importe quels matériaux), il y a peu de contraintes géométriques. La gravité est facilement contrecarrée quelle que soit la catégorie de l'imprimante (dépôt ou solidification sélective).

Le problème de dévers et porte-à-faux augmentent à mesure que la taille des objets imprimés est importante. Ainsi, la résolution de ces derniers devient cruciale concernant les imprimantes 3D de grande échelle.

Des systèmes d'impression 3D d'échelle architecturale commencent cependant à voir le jour. Ces machines conçoivent des objets avec des résolutions de 1 à 3 cm. Il y a des exemples de machines appartenant à chacune des deux catégories d'impression décrites précédemment. Les machines de cette échelle impriment essentiellement des matériaux à matrice cimentaire. Concernant la méthode de solidification sélective, il y a D-shape dirigé par Enrico DINI. Concernant la méthode de dépôt sélectif, il y a Contour Crafting dirigé par Koshnevis et Chinese Matériel qui a en avril dernier réalisé les premiers bâtiments fonctionnels imprimés en 3D.



D-shape, entreprise dirigé par Enrico DINI, (méthode par solidification sélective)



Chinese Matériau, (méthode par dépôt sélectif)

Nous pouvons constater par ces images qu'à grande échelle la solidification sélective permet de réaliser des formes totalement libres, mais a le désavantage de requérir le déplacement d'une très grande quantité de matière. En effet, même si la poudre utilisée comme support peut être réutilisée pour fabriquer un autre objet, il est nécessaire de déplacer, au moins le volume englobant de l'objet (la « bounding box »), auquel il est nécessaire d'ajouter le volume dû aux pentes d'écoulement de la poudre. Ainsi, pour réaliser l'objet que nous voyons sur les photos, qui a pour dimension environ 3x3x3m, il a fallu déplacer à deux reprises (pour l'utiliser comme support puis pour le retirer une fois l'objet achevé) au moins 18m³ de matière.

Ainsi, la solidification sélective tourne, en augmentant l'échelle, en une gigantesque opération de terrassement. Cette méthode d'impression semble donc plus adaptée à des échelles plus réduites.

Par ailleurs, cette méthode ne permet pas de réaliser une impression multi matériaux, et rend impossible la fabrication in situ étant donné la non transportabilité de la machine (on est obligé d'avoir une structure qui englobe tout le bâtiment).

La méthode de dépôt sélectif, quant à elle (toujours, d'après les photos), semble ne permettre que la réalisation de formes en 2.5D, soit des extrusions linéaires d'un dessin plan. Cette méthode permet cependant de réaliser une impression multi matériaux. Par ailleurs, il n'est pas nécessaire d'avoir une machine englobant le bâtiment, la tête d'impression peut être indépendante d'une structure extérieure. Ainsi, le dépôt sélectif semble plus approprié pour la grande échelle que la solidification sélective.

Par ailleurs, la thèse datant de 2002 de Hongkyu Kwon décrivant les débuts des expérimentations du procédé de fabrication Contour Crafting (qui est un procédé de dépôt sélectif), parlait déjà de réalisation de forme tridimensionnel, c'est-à-dire possédant des dévers et porte-à-faux. Dans cette thèse il commençait également déjà à parler de Co-extrusion en vue d'imprimer différents types de matériaux.

L'expérimentation : mécanique, programmation, matière et trajectoire.

Mon travail portant sur les méthodes d'impression 3D multi matériaux, j'ai cherché à réaliser une tête d'impression me permettant d'extruder des matériaux aux propriétés différentes.

Le but de cette expérience est tout d'abord d'identifier, en termes de mise en œuvre, les différences d'un tel procédé, comparé à des méthodes traditionnelles. Puis d'analyser le potentiel de ce procédé dans la construction. Ce procédé permet théoriquement de mettre en place un file to factory permettant de réaliser des formes libres. Ceci est-il toujours envisageable concernant de grandes échelles d'objets ? Ce type de procédé pose la question de la répartition de la matière dans un objet. Quels procédés de conception sont les plus appropriés pour réaliser une telle opération.

Pour simplifier le problème, j'ai commencé par identifier des dualités de performances propres aux matériaux mis en œuvre en architecture, tel que : dense/expansé, rigide/flexible, transparent/opaque... je me suis ensuite limité à l'une d'elles. Mon choix s'est fixé sur la dualité dense/expansée.

L'idée était ensuite de trouver deux matériaux compatibles (qui allaient être le moins sujet à des problèmes de ségrégation), qui selon leur proportion dans un mélange allait me permettre d'obtenir un domaine de performance le plus étendu possible. Pour des raisons de coût, mon choix s'est tourné vers un mélange de ciment et agrégat léger (tel que polystyrène, perlite ou argile expansé). Les proportions de chacun de ces deux matériaux dans un mélange me permettaient d'obtenir différents gradients de densité, allant d'un matériau lourd structurel à un matériau léger isolant.

La réalisation d'une machine d'impression 3D nécessite des connaissances de base dans plusieurs domaines assez différents, tels que, la mécanique (les systèmes de mélange, les systèmes de dosage), la programmation, les matériaux (rhéologie) et la robotique.

Les matériaux utilisés doivent être compatibles aux systèmes de dosage. Ainsi, la réalisation de formes dite non standard passe nécessairement par une standardisation des matériaux utilisés (granulométrie de poudre contrôlée, viscosités contrôlées...).

Le système de dosage doit être synchronisé avec le parcours du robot. Ceci signifie que ce procédé nécessite l'utilisation de machines à commandes numériques à la fois pour déposer la matière au bon endroit, mais également pour extruder au bon moment le matériau désiré. Ainsi, il faut se poser la question de comment donner ces instructions à la machine afin de réaliser l'objet désiré. En effet, il y a un pont direct entre la modélisation numérique de l'objet et sa fabrication en impression 3D. Le dessin de la géométrie, la répartition des différents gradients de matériaux et la définition du parcours sont modélisés pour aboutir à une séquence d'instruction qui permettra la réalisation de l'objet. Ces instructions machines sont communiquées au travers d'un langage informatique.

Le parcours du robot ainsi que la répartition de la matière doivent être définis en fonction de nombreux paramètres. En effet, il ne suffit pas de prendre en compte la géométrie de la forme et la performance désirée (résistance structurelle, ou isolation thermique) pour réaliser le parcours. Le parcours lui-même va influencer sur la forme et les performances. Il y a une double anisotropie intrinsèque à l'extrusion multi matériaux. Il y a tout d'abord celle désirée, qui est provoquée par le changement de la composition du dosage du matériau imprimé. Mais il y a également celle induite par le procédé de fabrication. Le comportement au sein d'un cordon d'extrusion n'est pas le même que celui entre deux cordons. L'interface entre deux cordons est un point de faiblesse. Ainsi, l'orientation des cordons, soit la trajectoire de l'extrusion, va être un facteur déterminant dans les performances de l'objet final.

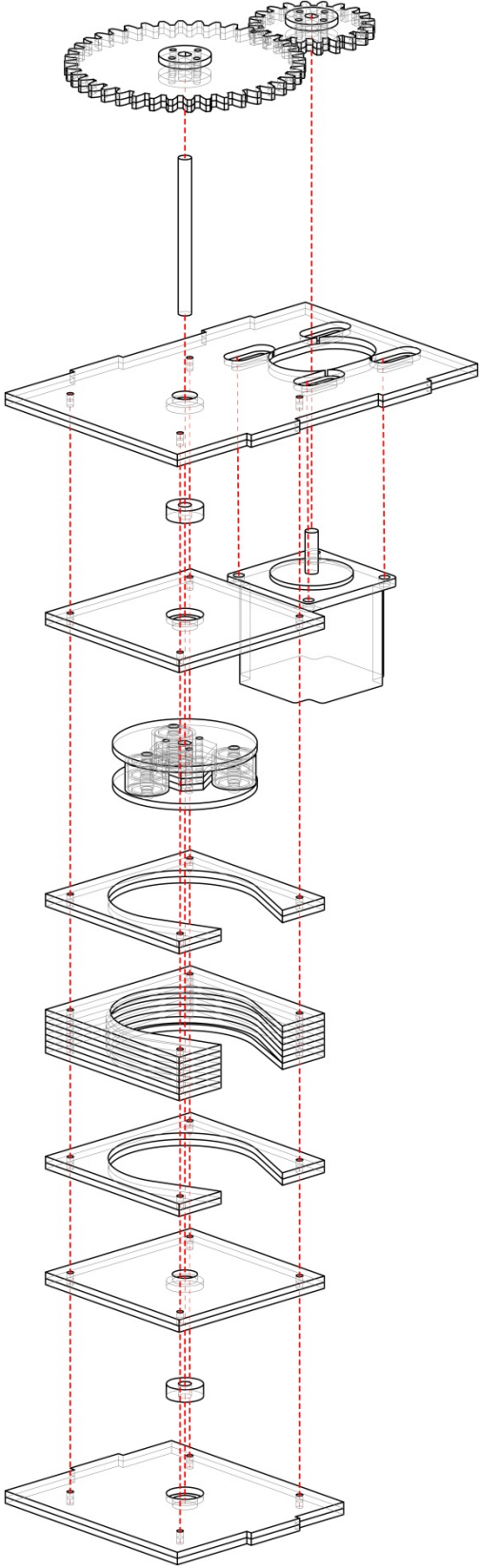
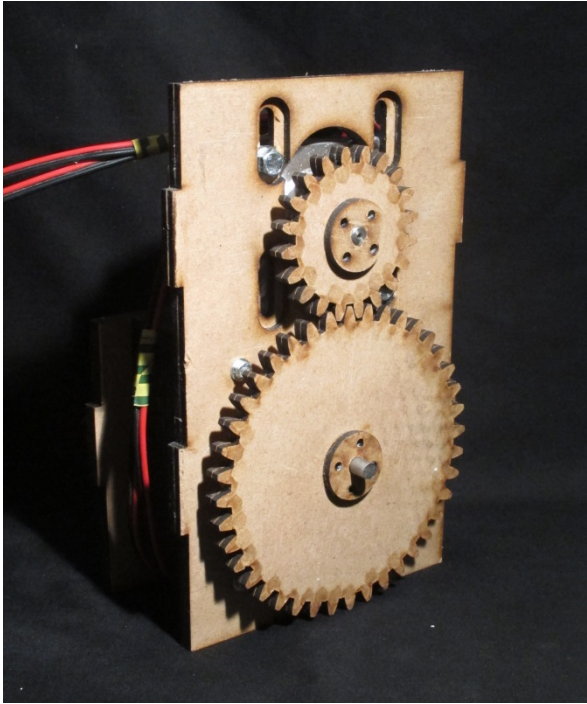
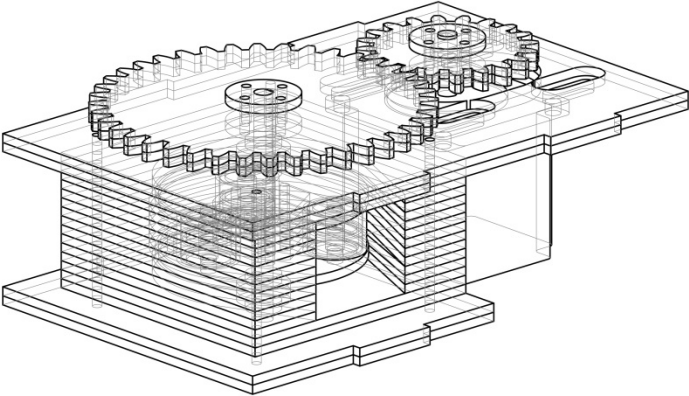
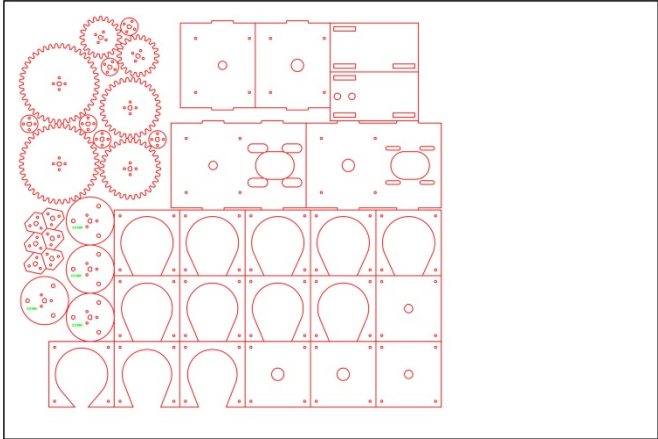
Le principe de fonctionnement de la tête d'impression réalisée est le suivant : un pré mélange de ciment est réalisé, ce dernier est convoyé jusque dans une vis de mélange dans lequel est ajouté le polystyrène, ainsi qu'éventuellement un accélérateur de prise (liquide ou en poudre).

-Mécanisme

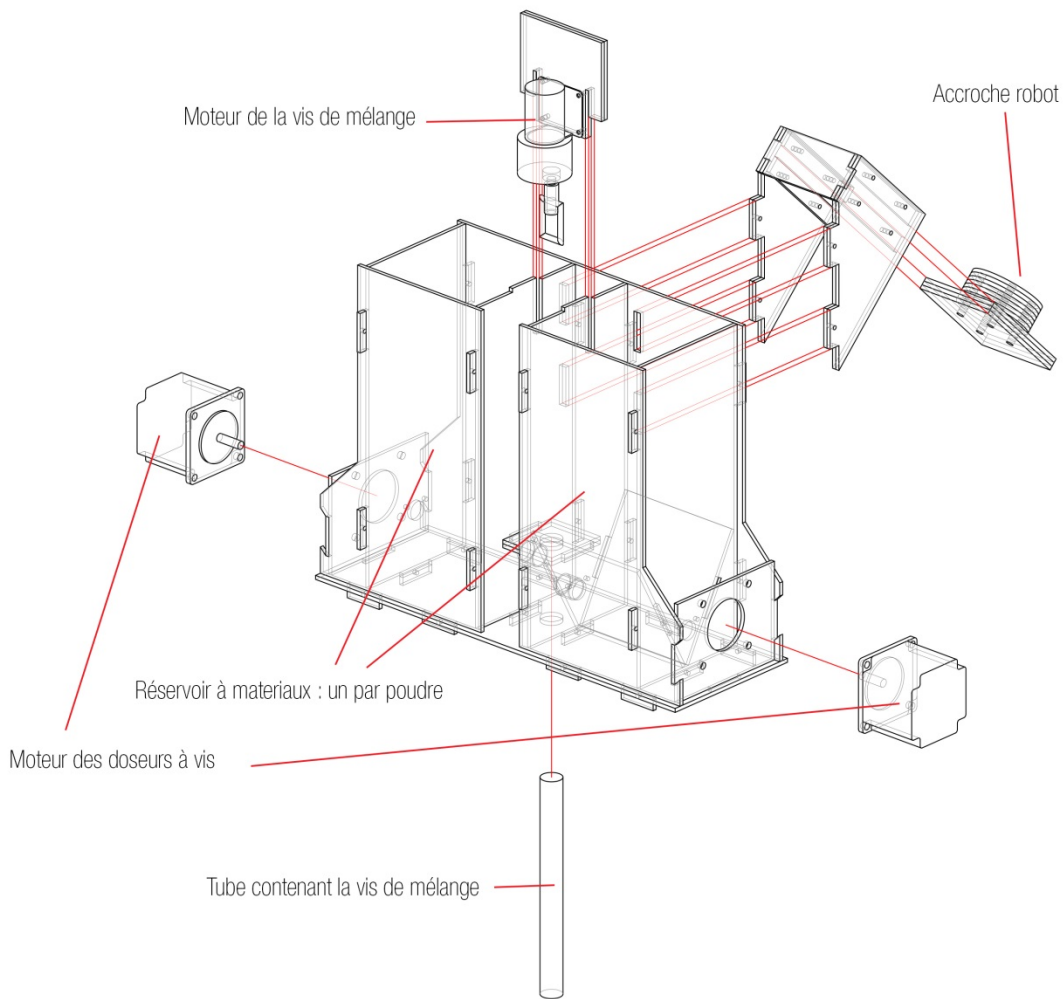
J'utilise bras robotisé récemment acquis par l'école pour réaliser le parcours de l'impression en y accrochant la tête d'extrusion.

La réalisation de la tête d'impression nécessite des systèmes de dosage précis permettant d'ajuster la composition du mélange extrudé tout au long du parcours de la machine. Je me suis alors intéressé aux systèmes de dosage et de mélange que l'on retrouve dans le milieu industriel. Ainsi, j'ai identifié deux types de doseurs compatibles avec les matériaux que j'utilise, à savoir des doseurs à vis sans fin (appropriés aux poudres) et des pompes péristaltiques concernant les liquides (accélérateur) et la pâte de béton. Pour des raisons de budget, ces doseurs ont été en partie réalisés à l'aide de la découpeuse laser, en MDF.

Ci-dessous le plan de découpe, les photos ainsi que les schémas de la réalisation de la pompe péristaltique à pâte de ciment.



Ci-dessous le schéma de la tête d'extrusion (les doseurs à vis ainsi que le mélangeur y sont intégrés).

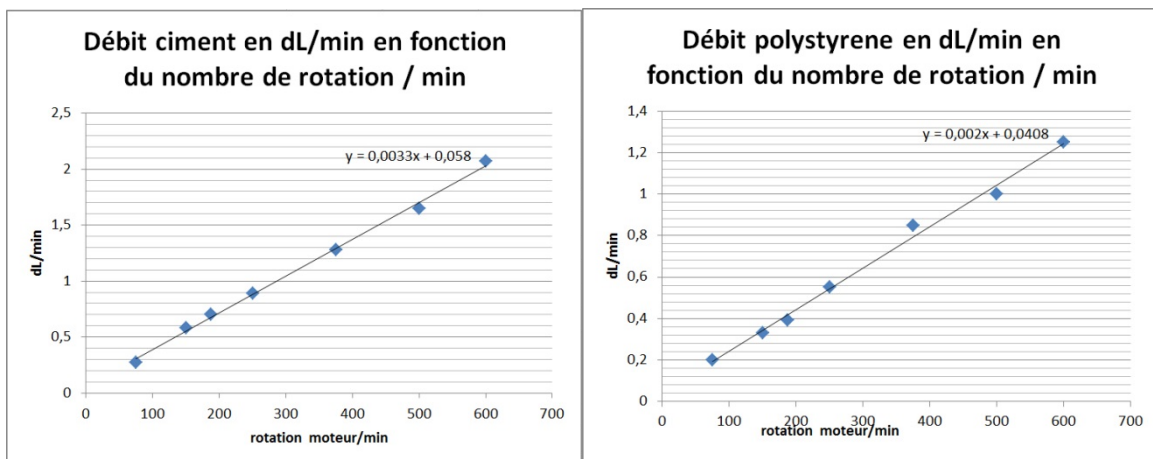


Programmation

L'ensemble du système a ensuite dû être commandé numériquement. Un programme a été écrit sur processing pour faire le pont entre le plug-in Hal (servant à commander le robot) et les commandes des doseurs dans le but d'imprimer le bon dosage au bon endroit.

Par ailleurs, les dosages étant réalisés de manière artisanale, ils ont dû être testés pour s'assurer de leurs fiabilités, mais également afin de connaître le débit en fonction de la vitesse des moteurs.

Voici ci-dessous les courbes de test mettant en évidence la fiabilité des doseurs ainsi que le débit en fonction de la vitesse des moteurs.



-Matière

Les premiers tests que j'ai réalisés concernant la matière visait à définir le domaine de performance du couple de matériaux sélectionnés. J'ai choisi le couple béton/polystyrène car ce dernier, contrairement aux autres agrégats légers est hydrophobe (il n'absorbe pas d'eau contrairement à la perlite ou à l'argile expansé). De ce fait je peux incorporer à un pré-mélange de béton du polystyrène sans assécher ce premier. Le mélange Béton polystyrène m'a permis de réaliser des gradients de densité allant de 2.2 à 0.27.

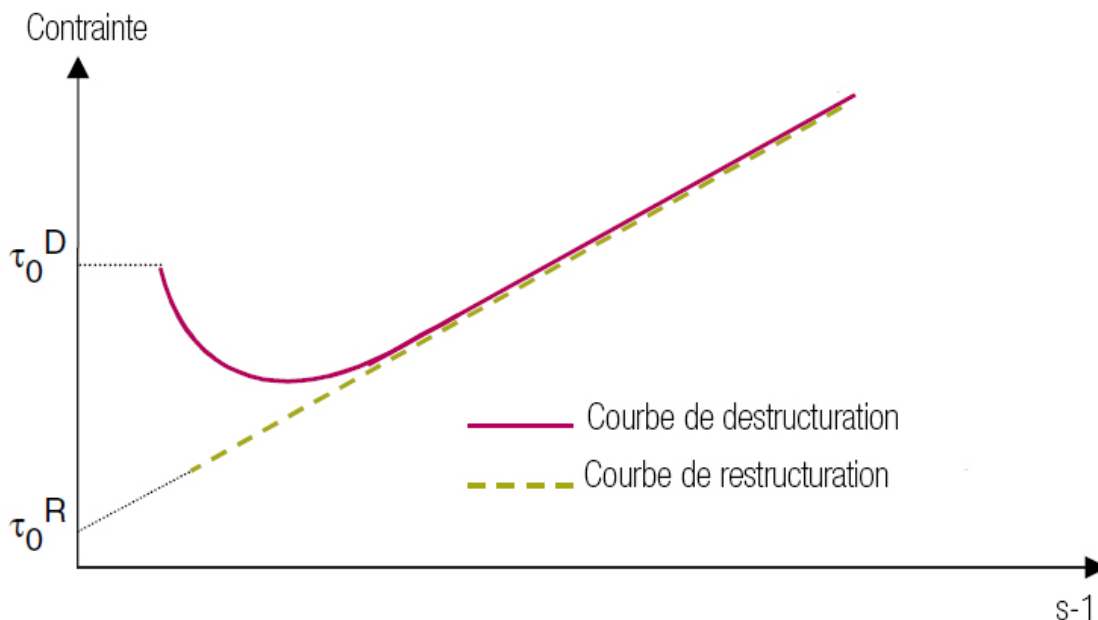


Ci-dessus, photo de coupe de blocs de béton polystyrène de densité différente réalisés à la main (m'a permis de définir le domaine de densité du couple béton/polystyrène)

Une fois mon couple de matériaux sélectionné, il m'a fallu travailler plus en détail sur la formulation du béton que j'allais extruder. En effet, pour pouvoir être imprimé, la matière à la sortie de l'extrudeuse doit avoir une certaine consistance de telle sorte qu'elle puisse se tenir d'elle-même et, par la suite, supporter le poids des autres couches. Le comportement de la matière doit donc être pensé en fonction du temps. Il m'a fallu travailler sur la rhéologie du matériau.

-La rhéologie du béton

Différents paramètres sont à prendre en compte. Les paramètres essentiels sont les suivants : seuil de cisaillement, seuil de cisaillement au repos, et viscosité.



Courbe rhéologique issue de *Rhéologie des bétons autoplaçants, évaluation de la thixotropie* (voir bibliographie)

TOD représente le seuil de cisaillement au repos.

TOR représente le seuil de cisaillement.

La pente de la courbe de restructuration représente la viscosité du mélange.

Le seuil de cisaillement représente la contrainte minimale de plastification hors structuration. C'est une valeur qui est indépendante de la floculation. C'est la valeur de l'ordonnée à l'origine de la courbe de restructuration. Elle représente la contrainte de cisaillement entre grain. C'est une valeur qui augmente à mesure que la granulométrie du mélange est fine.

Le seuil de cisaillement au repos représente la contrainte minimale de plastification après structuration par floculation. Cette valeur est liée à la thixotropie du matériau. Il s'agit d'une structuration réversible qui est indépendante du vieillissement du béton, qui quant à lui concerne la prise du béton. C'est une contrainte qui est la somme du seuil de cisaillement et de la contrainte de cohésion par floculation.

La viscosité détermine l'évolution du seuil de cisaillement en fonction de la contrainte de cisaillement appliquée au mélange. Plus le mélange est visqueux, plus la dérivée de la courbe de restructuration est importante.

Deux stratégies peuvent être adoptées pour réaliser le mélange dont j'ai besoin.

La première est de travailler sur la thixotropie du mélange, soit sur le seuil de cisaillement au repos. On réalise un mélange fortement thixotrope avec un seuil de cisaillement faible. Le pré-mélange continuellement remué est alors proche d'un liquide et peut ainsi être facilement pompé. Une fois déposé, le matériau flocule rapidement et peut supporter le poids d'autres couches.

La deuxième est de travailler sur le seuil de cisaillement et l'accélération de la prise. On travaille sur un pré-mélange possédant une granulométrie très fine. Un accélérateur est ensuite ajouté au dernier moment dans la vis de mélange (en même temps que le polystyrène) pour augmenter la rapidité du durcissement.

Dans les deux cas, l'idéal serait d'avoir une dérivée de la courbe de restructuration nul (ce qui me permettrait d'être sûr d'avoir un comportement linéaire concernant la quantité de matière pompée en fonction de la vitesse de rotation).

-Test n°1 au mini cône :

J'ai tout d'abord commencé par réaliser des formulations de béton sans adjuvant afin de mieux comprendre comment le différent constituant du béton affecte les propriétés rhéologique du mélange.

J'ai tout de même orienté ma formulation vers un béton possédant un seuil de cisaillement élevé en travaillant avec une granulométrie très fine (sable de fontainebleau ; calibré entre 0.1 et 0.6 mm).

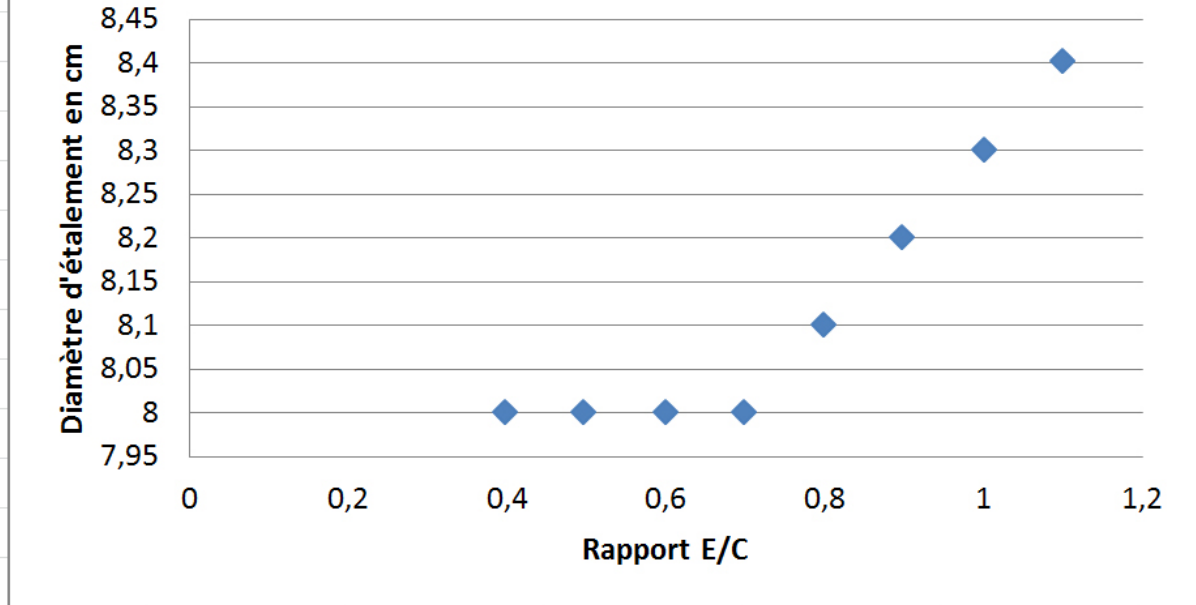
Ma première série de test a donc consisté à faire varier le rapport E/C d'un mélange et d'en observer les variations de seuil de cisaillement par le biais d'un test au mini cône (le diamètre du cône est de 8 cm).

Mon mélange de base était constitué de 50% de sable (en volume), de ciment blanc (I.Design ; technocem blanc 42.5R CEM II/B-LL 42.5 R CP2 "SB") et d'eau du robinet.

Les résultats du test figurent dans le tableau ci-dessous.

volume sable (%)	50	50	50	50	50	50	50	50
E/C	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1
Masse sable (kg)	1,325	1,325	1,325	1,325	1,325	1,325	1,325	1,325
Masse Eau (kg)	0,276785714	0,303921569	0,3251748	0,3422713	0,3563218	0,3680739	0,3780488	0,3866213
Masse ciment (kg)	0,691964286	0,607843137	0,541958	0,488959	0,4454023	0,408971	0,3780488	0,3514739
mass volumique du mélange (kg/dm3) ou (t/m3)	2,29375	2,236764706	2,1921329	2,1562303	2,1267241	2,1020449	2,0810976	2,0630952
quantités utilisée pour l'expérimentation 1								
Masse sable (g) 1/5	265	265	265	265	265	265	265	265
Masse Eau (g) 1/5	55,35714286	60,78431373	65,034965	68,454259	71,264368	73,614776	75,609756	77,324263
Masse ciment (g) 1/5	138,3928571	121,5686275	108,39161	97,791798	89,08046	81,794195	75,609756	70,294785
mesure de l'affaissement du cône dans deux directions								
D1 (cm)	8	8	8	8	8,1	8,2	8,3	8,4
D2 (cm)	8	8	8	8	8,1	8,2	8,3	8,4

Etalement au mini cône en fonction du rapport E/C



Voici la protocole de l'expérience :

- Le bol servant à réaliser la préparation, ainsi que la tige de mélange est nettoyée puis séché
- Environ 0.2dl de matière sont préparé pour la réalisation de chacun des tests.
- La préparation est mélangée manuellement pendant 5 min avec une tige
- La plaque en Plexiglass ainsi que le cône est humidifiée avec une éponge
- Le mélange est déposé dans le cône
- Je racle le surplus
- Je tape 8 fois avec un bâton pour tasser le mélange
- Je retire le cône.

Commentaires à propos de chacun des mélanges :



E/C = 0,4 ; Le mélange est très sableux, il ne s'écoule pas du tout ; présence de grumeau de ciment.



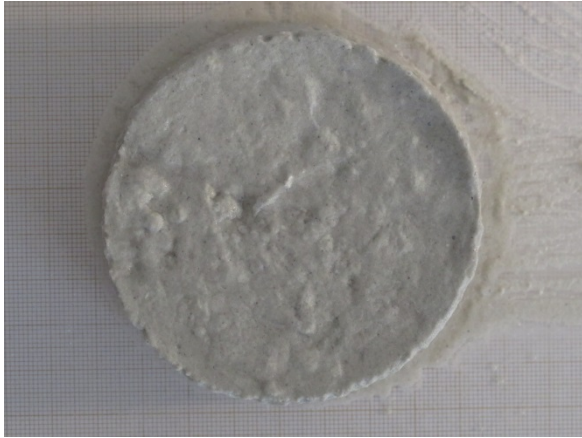
$E/C = 0.5$; Le mélange est très sableux, il ne s'écoule pas du tout ; présence de grumeau de ciment (semblable à $E/C = 0,4$)



$E/C = 0.6$; Le mélange est très sableux, il ne s'écoule pas du tout ; présence de grumeau de ciment (semblable à $E/C = 0,4$ et $0,5$) Les grumeau sont cependant plus homogènes.



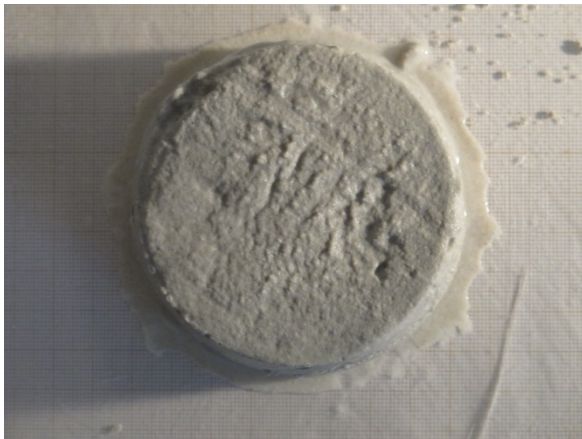
$E/C = 0.7$; Le mélange est très sableux, il ne s'écoule pas du tout ; présence de grumeau de ciment (semblable à $E/C = 0,4, 0,5$ et $0,6$) Les grumeau sont cependant plus homogènes.



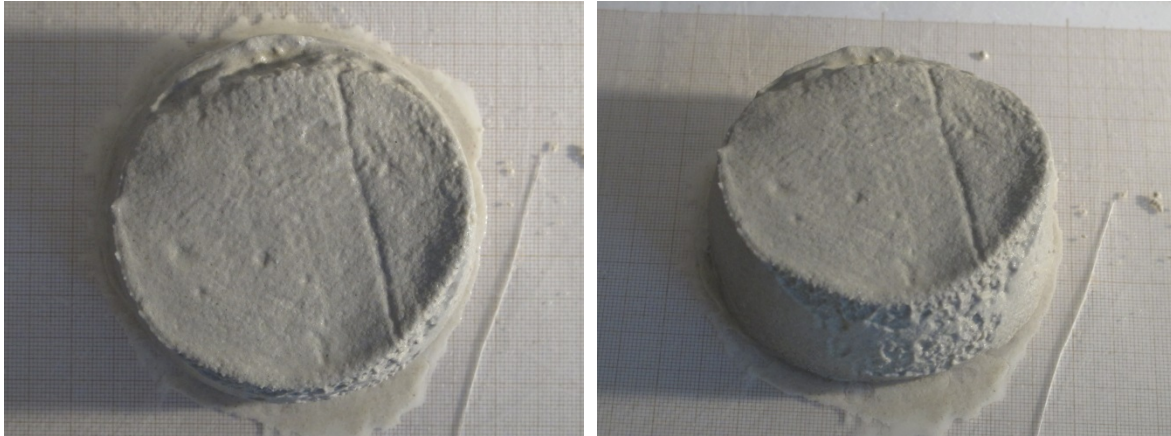
$E/C = 0.8$; Le mélange commence à devenir intéressant bien que toujours sableux effet de ventouse au démoulage, léger affaissement.



$E/C = 0.9$; On commence à avoir de la vraie pâte, plus trop de grumeau cependant toujours un peu trop sableux.



$E/C = 1.0$; Le mélange se tient un peu trop. Il faudrait ajouter du plastifiant.



$E/C = 1.1$; Le mélange se tient un peu trop. Il faudrait ajouter du plastifiant.

Conclusion de l'expérimentation :

Le temps de mélange est un facteur important pour les bétons à seuil de cisaillement élevé.

Sur certains tests je n'humidifiais pas suffisamment le cône créant ainsi un effet de ventouse qui a pu nuire au résultat.

Le seuil de cisaillement d'un mélange diminue à mesure que le rapport E/C augmente.

Étant donné que le sable utilisé est calibré très finement, il « assèche » le mélange. Il faut donc un rapport E/C très élevé pour obtenir une rhéologie acceptable. Le béton obtenu, même avec un E/C de 1.1, possède un seuil de cisaillement bien trop élevé pour pouvoir être pompé avec le système de dosage que je possède actuellement. Ainsi, le mélange est constitué d'une trop grande quantité de sable fin.

J'ai ensuite réalisé d'autres formulations (toujours sans adjuvant) en vérifiant que le mélange pouvait bien être pompé. La formulation sélectionnée fut la suivante : $E/C = 0.5$ et 30% de sable de fontainebleau.

Par la suite, un adjuvantier (la société Chryso) m'a donné plusieurs adjuvants afin de préciser ma formulation. Ils m'ont donné deux types d'accélérateurs, un plastifiant réducteur d'eau et une résine d'accrochage. Lors d'un entretien avec eux, nous avons mis au point une ébauche de formulation. Nous nous sommes alors davantage focalisés sur la première stratégie exposée plus haut, qui visait à travailler sur la thixotropie du matériau afin d'éviter d'utiliser un accélérateur de prise. Pendant que la tête d'extrusion réalisait un parcours, nous avons modifié la constitution du pré-mélange de béton (qui était à l'origine une formulation de $E/C = 0.5$ et 30% de sable de fontainebleau) en y incorporant progressivement les adjuvants qu'ils m'avaient apportés. Nous avons alors commencé à obtenir des mélanges très intéressants. En effet, nous avons ajouté du plastifiant et de la résine d'accrochage. Le premier servait essentiellement à augmenter l'ouvrabilité du matériau pré-mêlé, soit à stabiliser les propriétés rhéologiques du pré-mélange, et à faciliter l'homogénéisation du mélange avec le polystyrène. Le second quant à lui servait à augmenter la thixotropie du mélange : le mélange était liquide quand on le remuait et se solidifiait dès que l'on cessait de le faire. Le matériau extrudé possédait donc rapidement une bonne tenue. Il reste maintenant à retrouver les bonnes proportions d'adjuvant.

-Trajectoire

Concernant les objets imprimés à produire, je souhaiterais tout d'abord réaliser un premier test pour mettre en évidence l'importance de l'orientation des cordons lors de l'impression d'un matériau. Pour ce faire, je compte réaliser trois éprouvettes : une éprouvette témoin, réalisée avec du béton coulé, et deux autres imprimées avec des parcours différents (voir schéma ci-dessous). Un parcours orthogonal et un parcours concentrique. Ces éprouvettes seront ensuite testées en compression.

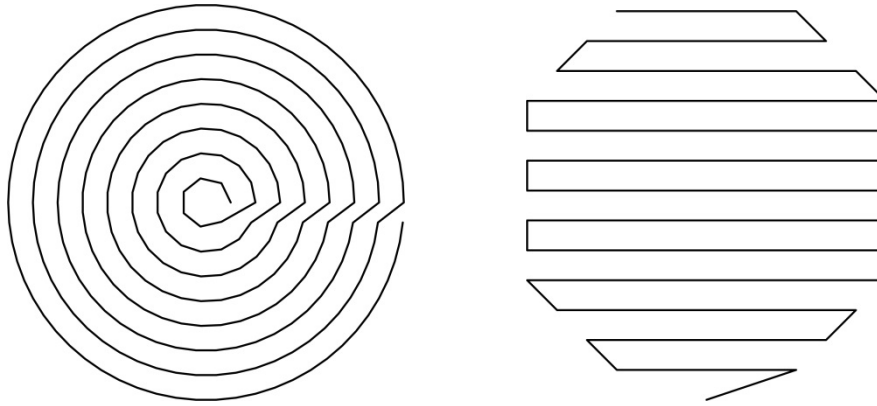


Schéma représentant le parcours de l'extrusion sur une couche. Il s'agit des deux parcours qui serviront à réaliser les éprouvettes imprimés.

Le second teste que je veux réaliser consiste à réaliser une impression multi matériaux en répartissant différent gradient de densité dans un objet imprimé. Ainsi, je souhaiterai réaliser une sorte de panneau sandwich. La matière isolante serait imprimée à l'intérieur tandis que la matière structurelle servirait à imprimer les parois.

Bibliographie

-Hod Lipson, Melba Kurman, *Fabricated the new world of 3D printing, the promise and the peril of machine that can make (almost) anything*. John Wiley & Sons ; 2013

- Nicholas A. Meisel and Christopher B. Williams Design, Research and Education for Additive Manufacturing Systems Laboratory, Virginia Polytechnic Institute and State University; and Andrew Gaynor and James K. Guest, Topology Optimization Group, Johns Hopkins University, *Multiple-material topology optimization of compliant mechanisms created via Polyjet 3D printing*. 2014

-Jonathan D.Hiller and Hod Lipson (computational laboratory Cornell University), *Multi Material Topological Optimisation of Structures and Mechanisms*. GECCO ; 2009

-Zahia Toutou, Michael Cador, Nicholas Roussel, Laetitia D'Aloia Schwartzentruber, Eric Vilbé, Robert Leroy, *Rhéologie des bétons autoplaçants, évaluation de la thixotropie*. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées ; 2005.

-N. Roussel, C. Stefani, R. Leroy, *From mini-cone test to Abram cone test: measurement of cement-based material yield stress using slump tests*. Cement and Concrete Research ; 2005.

-Hongkyu Kwon, *Experimentation and analysis of contour crafting (CC) process using uncured ceramic materials*. A Dissertation Presented to the FACULTY OF THE GRADUATE SCHOOL UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree DOCTOR OF PHILOSOPHY (INDUSTRIAL AND SYSTEMS ENGINEERING) ; August 2002

-Michael Hensel, *Performance Oriented Architecture*. AD primers ; 2013