

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir

Elibrahimi –Bordj Bou Arreridj Faculté

Des Sciences et de la Technologie

Département Génie Civil

جامعة محمد البشير الابراهيمي

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : Master

Filière : Génie Civil
Option : Matériaux

**THÈME : Caractéristique mécanique et
rhéologique du mortier cimentaire imprimé en 3D**

Préparé par :

Mati Raouf

Ouzaiied Youcef

Encadreur : Dr.Noui Ammar

Devant le jury :

Président : Achour Yacine

Examineur : Kessal Oussama

Examineur : Belkadi Abd rraouf

MCA

MCB

MCB

Université de BBA

Université de BBA

Université de BBA

2019/2020



DÉDICACE

*J'ai le grand plaisir de dédier ce
mémoire*

*A mes cher parents ma mère et mon
père*

*Pour leur patience, leur amour,
leur soutien et leurs
encouragements.*

A mes frères.

A mes amies mes camarades.

*Sans oublier les professeurs de
l'enseignement supérieur*

Raouf



DÉDICACE

*J'ai le grand plaisir de dédier ce
mémoire*

*A mes cher parents ma mère et
mon père*

*Pour leur patience, leur amour,
leur soutien et leurs
encouragements.*

A mes frères.

*A mes amies mes camarades.
Sans oublier les professeurs de
l'enseignement supérieur*

Youcef

A decorative border with intricate black floral and scrollwork patterns surrounds the text. The border is thicker at the corners and tapers towards the center.

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience de bien mener ce travail, qu'il soit béni et glorifié

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude, toute notre reconnaissance et tout notre remerciement à :

*Mon encadreur **Dr : Noui Ammar** pour sa patience, sa disponibilité, pour son écoute, ses conseils, ainsi que pour sa rigueur scientifique, qu'il a su me communiquer pour mener au mieux ce travail de recherche.*

En deuxième lieu, je remercie les membres de jury, de m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail. Certes, leurs remarques et leurs conseils seront aussi utiles travailler.

Nous associe à ces remerciements tous mes enseignants (es) du département de génie civil.

Tous les gens qui nous ont aidés de près ou de loin dans la réalisation de ce modeste travail.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à tous nos proches et amis qui nous ont toujours soutenues et encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.

Résumé :

A l'heure actuelle, les technologies d'impression 3D commencent à se développer dans notre société. L'un des domaines où ce procédé se développe de manière continue est celui de la construction. Déjà de nombreux projets ont été réalisés grâce à l'impression 3D, notamment l'impression 3D des matériaux cimentaires. Cette technologie permet de faire de grandes économies de matière et pourrait, grâce à sa développement, permettre de réduire considérablement les coûts des chantiers de construction.

L'impression 3D du béton par additive (extrusion/dépôt) est un processus complexe en plusieurs étapes qui doit être bien décrit et optimisé. Les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais (et leurs évolutions) doivent être optimisées aussi bien pour l'extrusion que pour les procédés d'impression 3D. Par conséquent, les matériaux doivent présenter des propriétés spécifiques telles que la stabilité pendant l'extrusion, la stabilité de la forme lorsque le matériau coule de l'extrudeuse, le jointoiement entre les couches et un raidissement rapide afin de supporter le poids des couches subséquentes. Ces propriétés spécifiques du procédé doivent être décrites en termes de propriétés intrinsèques des matériaux telles que la perméabilité, la viscosité, la contrainte seuil et la vitesse de structuration. Par exemple, la vitesse de structuration sera utile afin de minimiser l'intervalle de temps entre deux placements superposés consécutifs. Ce travail vise à décrire le lien entre les caractéristiques intrinsèques des matériaux et la technique d'impression 3D par extrusion afin d'optimiser la méthode de traitement.

L'étude a été réalisée dans un premier temps sur des mortiers .

A l'état frais, des essais de temps de prise et d'affaissement ont été réalisés, cela dans le but de caractériser la rhéologie du mortier. En effet, celui-ci doit être suffisamment fluide pour être mis en œuvre dans l'imprimante, mais suffisamment ferme pour tenir en place une fois imprimé.

A l'état durci, des mesures de flexion/compression.

Mots clés :

Rhéologie, impression 3D, matériaux cimentaires, seuil de cisaillement, thixotropie, flexion/compression.

Abstract:

Nowadays, 3D printing technologies are becoming more and more develop in our society. This process is continuously developing in construction field. Many projects have been realized thanks to 3D printing, especially 3D printing of cement-based materials. This technology allows great savings in materials and could, thanks to its development, involve a great decrease in the cost of constructions.

Extrusion 3D printing of concrete is a complex multistep process that needs to be well described and optimized. The fresh properties of cement-based materials have to be optimized for both the extrusion and the additive manufacturing 3D printing processes. Therefore, the materials have to exhibit some specific properties such as stability during extrusion, shape stability when concrete flows from the orifice extruder, jointing between layers and quick stiffening in order to sustain the weight of the subsequent layers.

Those specific process properties must be described in terms of intrinsic materials properties such as permeability, viscosity, yield stress and structural build-up rate. For example, the structural build-up rate will be helpful in order to minimize the time step between two consecutive superposed placements. This work aims to describe the link between the intrinsic material characteristics and the extrusion 3D printing technique in order to optimize the processing method.

The study was initially carried out on mortars. In the fresh state, setting time and sagging tests were realised out in order to characterise the rheology of the mortar. Indeed, the mortar must be fluid enough to be applied in the printer, but firm enough to hold in place once printed. In the hardened state, bending/compression .

Keywords:

Rheology, 3D printing, cement-based materials, yield stress, thixotropy, bending/compression.

ملخص:

اليوم ، بدأت تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في التطور في مجتمعنا. أحد المجالات التي تتطور فيها هذه العملية باستمرار هو البناء. تم بالفعل تنفيذ العديد من المشاريع باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد ، وخاصة الطباعة ثلاثية الأبعاد للمواد الأسمنتية. تتيح هذه التقنية توفير كبير في المواد ويمكن ، بفضل تطورها ، أن تقلل إلى حد كبير من تكاليف مواقع البناء.

الطباعة ثلاثية الأبعاد للخرسانة عن طريق المواد المضافة (البيتق / الترسيب) هي عملية معقدة متعددة الخطوات يجب وصفها بشكل جيد وتحسينها. يجب تحسين خصائص المواد الإسمنتية في الحالة الطازجة (وتطوراتها) من أجل كل من البيتق وعمليات الطباعة ثلاثية الأبعاد. لذلك ، يجب أن تظهر المواد خصائص محددة مثل الثبات أثناء البيتق ، واستقرار الشكل عندما تتدفق المواد من الطارد ، والربط بين الطبقات والتصلب السريع من أجل دعم وزن الطبقات اللاحقة. يجب وصف هذه الخصائص المحددة للعملية من حيث الخصائص الجوهرية للمواد مثل النفاذية واللزوجة وضغط العتبة ومعدل الهيكلية. على سبيل المثال ، ستكون سرعة الهيكلية مفيدة لتقليل الفاصل الزمني بين موضعين متتاليين . يهدف هذا العمل إلى وصف العلاقة بين الخصائص الجوهرية للمواد وتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد عن طريق البيتق من أجل تحسين طريقة المعالجة.

أجريت الدراسة أولاً على الملاط. في الحالة الجديدة ، تم إجراء اختبارات وقت التثبيت والترهل ، وذلك بهدف توصيف انسيابية الملاط. في الواقع ، يجب أن يكون مائعاً بدرجة كافية ليتم تنفيذه في الطابعة ، ولكن ثابتاً بدرجة كافية لتثبيتته في مكانه عند الطباعة. في الحالة المتصلبة ، قياسات الانثناء / الضغط.

الكلمات المفتاحية:

الريولوجيا ، الطباعة ثلاثية الأبعاد ، المواد القائمة على الاسمنت ، عتبة القص . متغيرة الانسيابية ، قياسات الانثناء / الضغط

Table des matières

Résumé :	2
Abstract:	3
Table des matières	5
Liste des figures :	8
Liste des tableaux :	10
Introduction générale :	11
Recherche bibliographique.....	12
I.1. L'impression 3D et la fabrication additive:	13
I.1.1 Genèse de la notion de « fabrication additive » :	13
I.1.2 Différentes technologies :	14
I.1.3 Différents types d'impression 3D :	15
I.1.4 Applications de l'impression 3D aux matériaux cimentaires :	17
I.1.5. Paramètres d'impression :	21
I.1.5.1. Blocages lors de l'extrusion :	21
I.1.5.2. Impression des couches :	21
I.1.6 Avantages, inconvénients et opportunités apportés par l'Impression 3D :	22
I.2 Rhéologie des matériaux cimentaires :	24
I.2.1 Variables rhéologiques fondamentales :	24
I.2.2 Types de comportements :	24
I.2.3 Lois de comportement et notion de seuil de cisaillement :	26
I.2.4 Le seuil de cisaillement :	27
I.2.5 Notion de thixotropie :	28
I.2.5.1. Modélisation de la thixotropie :	28
I.2.6 Méthodes d'essais empiriques sur béton frais :	30
I.2.6.1 Essai d'affaissement au Cône d'Abrams :	30
I.2.6.2 Essai d'étalement au Cône d'Abrams:	31
I.2.6.3 Essai d'étalement à la table à chocs:	32
I.2.7 Méthodes d'essai au rhéomètre :	32
I.3 Comportement des matériaux cimentaires imprimés par la technique	34
d'extrusion/dépôt :	34
I.3.1 Problématiques rhéologiques :	34
I.3.2 Principes physiques de pompage et d'extrusion :	35

I.3.3 Formulation de mortiers imprimables :	37
Programme de recherches expérimentales	39
Introduction :	40
II.A.1. Objectif :	40
II.A.2. Choix et caractérisation des matériaux :	40
II.A.2.1. Ciments OPC/CSA :	40
II.A.2.2. Sable :	41
II.A.2.3. Superplastifiant :	42
II.A.3. Méthode de formulation et de composition :	42
II.A.3.1. Dispositif manuel d'impression 3D au laboratoire :	42
II.A.3.2.cahier des charges :	43
II.A.3.3.Réalisation des Mortiers:	43
II.A.3.4.Mesure de l'extrudabilité:	44
II.A.3.5.Mesure de la constructibilité:	46
II.A.3.6. Détermination de la composition:	47
II.A.4. Essais a l'état frais :	48
II.A.4.1. Caractérisation a l'état frais au pistolet:	48
II.A.4.2. Affaissement au cône MBE:	49
II.A.4.3. Cisaillement estimé à partir du plongeur de Vicat au repos :	50
II.A.4.4. Enfoncement au Fall cône avec malaxage :	51
II.A.4.5. Mesure du temps de prise des mortiers CSA/OPC :	53
II.A.5. Essais a l'état durci :	55
II.A.5.1. Mesure de la résistance à la compression :	55
II.A.6. Analyse des Résultats :	58
II.A.6.1.Résultats à l'état frais:	58
II.A.6.1.1 mesure de l'affaissement au cône MBE:	58
II.A.6.1.2 Cisaillement estimé à partir du plongeur de Vicat au repos:	59
II.A.6.1.3 Enfoncement au Fall cône avec malaxage :	59
II.A.6.1.4 Mesure du temps de prise des mortiers CSA/OPC :	61
II.A.6.2.Résultats à l'état durci :	62
II.A.6.2.1. Mesure de la résistance en compression :	62
II.A.7.conclusion:	63
II.A.8.perspectives:	64
II.B.1. Objectif :	64
II.B.2. Choix et caractérisation des matériaux :	64

II.B.2.1 Ciment :	64
II.B.2.2 Fines de briques :	65
II.B.2.3 Sable :	67
II.B.2.4 Adjuvants :	67
II.B.3. Méthode de formulation et de composition :	68
II.B.3.1 Détermination de la composition témoin :	68
II.B.3.2. Compositions pour tests normalisés :	69
II.B.3.3. Compositions de substitution:	70
II.B.3.4.Réalisation des mortiers:	71
II.B.4. Essais à l'état frais :	73
II.B.4.1.Mesure de l'étalement à la table à secousses:	73
II.B.4.2.Mesure du temps de prise:	75
II.B.5. Essais à l'état durci :	77
II.B.5.1.Essais en flexion et compression à 7 et 28 jours:	77
II.B.5.1.Essais d'absorption par immersion totale :	78
II.B.6. Analyse des résultats :	79
II.B.6.1.Résultats à l'état frais:	79
II.B.6.1.1.Mesure de l'étalement à la table à secousses :	79
II.B.6.1.2.Mesure du temps de prise:	81
II.B.6.2.Résultats à l'état durci:	82
II.B.6.2.1Mesure de la masse volumique :	82
II.B.6.2.2Mesure de l'absorption d'eau par immersion:	82
II.B.6.2.3.Mesure de la résistance en flexion :	83
II.B.6.2.4.Mesure de la résistance en compression:	84
II.B.7. Conclusion :	85
Références bibliographies:	88
Annexes:	92

Liste des figures :

Figure 1: Premier dispositif de fabrication additive proposé par Jean-claude André, Olivier de Witte et Alain le Méhauté, destiné à la réalisation d'un modèle industriel [2][3].....	13
Figure 2 : Illustrations du principe de la photopolymérisation.	14
Figure 3 :Illustration du procédé par extrusion/dépôt.	15
Figure 4 :Différents types de prototypage rapide [7].	15
Figure 5 :Les imprimantes 3D de bâtiments Contour Crafting.....	16
Figure 6 :le système D-shape.	17
Figure 7 :Mobilier urbain imprimé par l'entreprise "Construction 3D".	18
Figure 8 :En haut le premier pont imprimé en 3D à Madrid, en bas le plus long pont imprimé du monde en Chine.	19
Figure 9 :Habitat imprimé par l'entreprise Apis Cor en Russie. En haut pendant le chantier, en bas lors de la livraison.....	19
Figure 10 :Le plus grand ouvrage imprimé au monde construit par l'entreprise Apis Cor.	20
Figure 11 :Différence entre le type des matériaux imprimés[22].	21
Figure 12 :Différentes modes de déposition des couches [22].....	22
Figure 13 :Courbes d'écoulement des fluides exclusivement visqueux.	24
Figure 14 :Courbes d'écoulement fluides viscoplastiques.	25
Figure 15 :Courbes d'écoulements associées aux modèles rhéologiques courants.....	26
Figure 16 :Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la déformation[28].....	27
Figure 17 :Schéma du comportement thixotrope [32].	28
Figure 18 : Comparaison de l'évolution du seuil de cisaillement entre le modèle de Roussel et celui de Perrot [33]......	29
Figure 19 :Evolution du seuil de cisaillement au cours du temps d'une pâte de ciment OPC[28].	29
Figure 20 :Exemple de l'évolution du seuil de cisaillement au cours du temps à l'aide d'un rhéomètre à béton BTRheom[34].....	29
Figure 21 :Dimensions du cône utilisé et classes de consistances.	31
Figure 22 :Matériel utilisé pour l'essai d'étalement et classes de consistances.	32
Figure 23 :Schéma de lu principe d'écoulement et gradient des vitesses.....	35
Figure 24 :Schéma du principe d'écoulement en sortie de l'extrudeuse et graphique présentant l'évolution de la force nécessaire à l'écoulement du matériau cimentaire[39].....	36
Figure 25 :Courbe granulométrique du sable.....	41
Figure 26 :Pistolet utilisé pour l'impression 3D manuelle.	42
Figure 27 :Schématisation du cahier des charges.....	43
Figure 28 :Malaxeur a mortier	44
Figure 29 :Blocage de la buse à cause du durcissement ou la filtration du mortier.....	45

Figure 30 :Exemple d'un matériau trop fluide.	45
Figure 31 :a) mortier trop fluide et considéré comme non constructible.	46
Figure 32 : Effondrement d'un mortier constructible (environ 8 couches) en raison d'une instabilité de structure.	46
Figure 33 :b) construction « manuelle » d'une pièce de plus de trente couches avec M93/7.	48
Figure 34 :Dimension du cône MBE par rapport au cône d'Abrams.	49
Figure 35 :Schématisation du cône MBE et de l'affaissement.	50
Figure 36 :Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance.	51
Figure 37 :Appareil Fall cône (à cône de chute).	52
Figure 38 :Appareil vicat automatique a enregistreur.	54
Figure 39 :Moules pour éprouvettes de mortier (40x40x160) mm.	55
Figure 40 :Table à choc.	56
Figure 41 :Développement de spécimens 4x4x16cm imprimés pour les essais mécaniques.	57
Figure 42 :Cône MBE test réalisé sur le mortier 93/7 en laissant le mortier au repos à 20, 30, 45 et 60 minutes respectivement.	58
Figure 43 :Seuil de cisaillement de M100/0 et M93/7.	59
Figure 44 :Résultats du Fall cône M100/0 et M93/7.	60
Figure 45 :Début et fin de prise avec l'aiguille de Vicat pour M100/0 et M93/7.	61
Figure 46 :Résistance à la compression de M100/0, M100/0-P, M93/7 et M93/7-P.	62
Figure 47 :Fines de brique utilisées dans les compositions.	65
Figure 48 :Répartition granulométrique des fines de brique et du ciment.	66
Figure 49 :Courbe granulométrique du sable normalisé [53].	67
Figure 50 :des moules utilisés et de la table à secousses.	72
Figure 51 :Table à secousses et dimensions du dispositif tronconique.	74
Figure 52 :Dispositif utilisé appareil vicat automatique.	76
Figure 53 :Des barrettes réalisées pour une composition.	78
Figure 54 :Résultats de l'essai d'étalement en fonction du degré de substitution.	79
Figure 55 :Estimations de valeurs de seuil de cisaillement.	80
Figure 56 :Temps de prise.	81
Figure 57 :Masse volumique à 7 et 28 jours.	82
Figure 58 :Résultats des essais d'absorption d'eau par immersion.	83
Figure 59 :Essais en flexion à 7 et 28 jours.	84
Figure 60 :Résultats des essais en compression à 7 et 28 jours.	84

Liste des tableaux :

Tableau 1 :Procédures utilisées dans les différentes méthodes d'impression 3D de matériaux cimentaires[11].	16
Tableau 2 :Opportunités technologiques de la production additive[25].	23
Tableau 3 :Caractéristiques des matériaux utilisés en impression 3D.[48].....	38
Tableau 4 :Compositions chimiques du CEM I et du CSA	41
Tableau 5 :Compositions minéralogiques et principales caractéristiques du CEM I et du CSA.....	41
Tableau 6 :Étapes suivie pendant la réalisation des mortiers.....	44
Tableau 7 :Compositions des mélanges de M100/0 et M93/7	47
Tableau 8 :Étapes suivies durant l'essai de prise et paramètres de mesure utilisés.....	53
Tableau 9 :Résultats de pénétration du test de Fall cône.	59
Tableau 10 :Caractéristiques du CEM I 52,5 N	65
Tableau 11 :Caractéristiques des fines de briques [52].....	65
Tableau 12 :Composition chimique des fines de briques [52].....	66
Tableau 13 :Dosage utilisé pour la composition témoin.	68
Tableau 14 :Quantités massiques utilisées dans la composition témoin.....	69
Tableau 15 :Aperçu des quantités massiques et grandeurs gardées constantes au cours des tests.	70
Tableau 16 :Compositions de substitution.	71
Tableau 17 :Étapes suivies pendant la réalisation des mortiers.	71
Tableau 18 :Étapes suivies lors de la mise en place du mortier dans les moules.....	72
Tableau 19 :Étapes suivies lors de la réalisation de l'essai d'étalement [NBN EN 1015-3].	73
Tableau 20 :Étapes suivies durant l'essai de prise et paramètres de mesure utilisés.....	75
Tableau 21 :Masse volumique des compositions à l'état frais.	80

Introduction générale :

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.

Des tests concernant la construction automatique de bâtiments ont été réalisés depuis un certain temps. Cela confirme le besoin de faciliter les procédés de construction. Cette volonté de créer des imprimantes 3D de béton est née dans les années 50, lors des essais d'un robot empilant les briques. Dans les années 60, une machine utilisant polyuréthane et une pompe à béton a été développée. Cependant, ces expériences n'ont pas donné suite, à cause du manque de technologies à l'époque. Dans les années 2000, de nouvelles méthodes de construction tentant d'imiter le béton sont développées. Par exemple, la technique D-Shape a été développée, permettant ainsi de créer des objets dans un matériau similaire à la pierre. Cette technique apparaît comme très prometteuse.

Ce travail de projet fin d'étude a porté sur les matériaux à base cimentaires, il avait pour principaux objectifs de :

- assurer l'impression 3D avec notre dispositif.
- Développer une méthodologie de formulation de ces mortiers pour adapter les formulations aux exigences d'impression et/ou au type de matériau utilisé.
- Formuler des mortiers et bétons destinés à être imprimés en 3D.

Dans la première partie, Ce travail s'articulera autour des connaissances théoriques existant dans plusieurs domaines. Le principe de l'impression 3D sera présenté avec un descriptif rapide des différentes techniques d'impression existantes. Un aperçu des constructions réalisées grâce à l'impression 3D sera également présenté. Ensuite, une analyse plus approfondie sera établie sur le comportement rhéologique des matériaux cimentaires. Une partie présentera notamment les implications que le processus d'impression 3D a sur les exigences relatives aux propriétés physico-chimiques des mortiers imprimés.

La deuxième partie du mémoire, La deuxième partie décrit tout d'abord les matériaux qui seront utilisés ainsi que la manière dont les compositions ont été formulées (la méthodologie de formulation suivie au cours de ce travail). Les mortiers formulés sont ensuite présentés et caractérisés aux états frais et durci.

Partie I

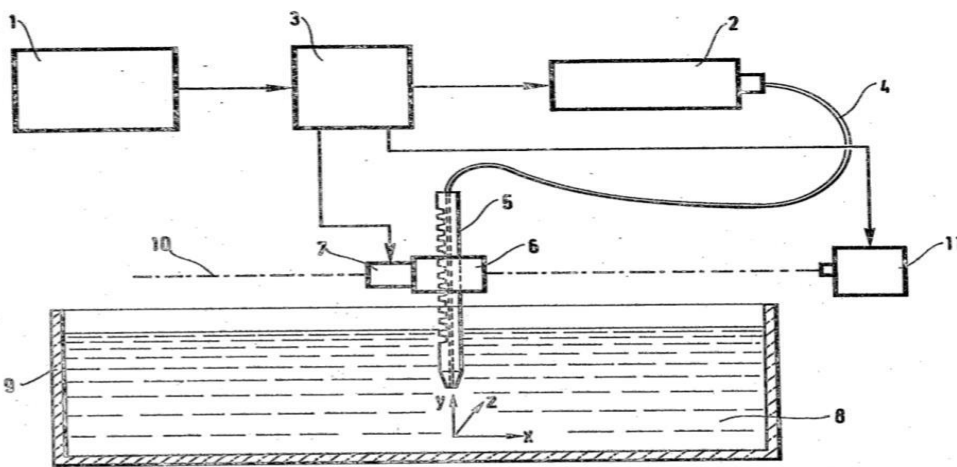
Recherche bibliographique

I.1. L'impression 3D et la fabrication additive:

I.1.1 Genèse de la notion de « fabrication additive » :

L'impression de formes tridimensionnelles est un concept qui a commencé à émerger dans les années cinquante. A l'époque, l'idée de pouvoir ériger et répliquer des formes dans les trois directions de l'espace à partir de robots relevait plus de la fiction que de la réalité. Néanmoins, plusieurs groupes de chercheurs et d'ingénieurs vont s'emparer du sujet, ce qui mènera aux premières demandes de brevets.

En 1984, trois ingénieurs français Jean-Claude André, Olivier de Witte et Alain le Méhauté déposeront le premier brevet sur la technologie d'impression 3D, initialement appelée « fabrication additive » (Figure 1). Faute de moyens financiers, le brevet ne sera pas maintenu [1].



Le dispositif comporte un système de mémoires 1 contenant des informations sur la forme de la pièce, un générateur laser 2 relié au système de mémoires 1 par un circuit de traitement 3, une fibre optique 4 couplée à la sortie du générateur laser 2, et des moyens 6, 7, 11 pour déplacer l'extrémité libre de la fibre 4 dans une cuve 9 remplie d'un liquide monomère polymérisable 8, ces moyens étant commandés par les signaux de sortie de circuit de traitement 3.

Application à la réalisation d'un modèle de bielle.

Figure 1: Premier dispositif de fabrication additive proposé par Jean-claude André, Olivier de Witte et Alain le Méhauté, destiné à la réalisation d'un modèle industriel [2][3].

L'impression 3D (ou 3D printing, 3DP) est définie par l'ASTM comme un processus de fabrication additive (ou additive manufacturing, AM) consistant à « assembler des matériaux pour fabriquer des objets à partir de données de modèles 3D, généralement couche après couche » [4]. C'est donc un processus automatisé consistant à réaliser des objets conçus en 3D avec un logiciel de CAO, en les imprimant couches par couches, de bas en haut.

I.1.2 Différentes technologies :

Les processus d'impression 3D se sont depuis démultipliés, impliquant des formats logiciels, des méthodes de fabrication et une utilisation de matériaux différents. On peut néanmoins classer les technologies selon six catégories. Deux seront décrites : la technologie fondatrice ainsi que celle qui servira dans notre étude.

La première technologie qui a été développée est la photopolymérisation. Celle-ci inclut la notion de stéréolithographie vue précédemment. Le principe repose sur une réaction de polymérisation. Une résine photopolymère est placée dans un bac, un axe robotisé permet de maintenir le support de l'objet à imprimer et de le déplacer suivant l'axe vertical. Le faisceau laser UV projeté sur la surface a pour effet de solidifier la résine selon les prescriptions géométriques du modèle 3D. Lorsque la première couche de résine est solidifiée, le support baisse d'une épaisseur de couche et le faisceau laser balaie de nouveau les zones devant être solidifiées (Figure 2). Il y a autant de cycles d'impression que de couches nécessaires à l'obtention du volume complet de la pièce. Le nombre de cycles d'impression de ce type est égal au nombre de couches nécessaires pour obtenir le modèle désiré [5].

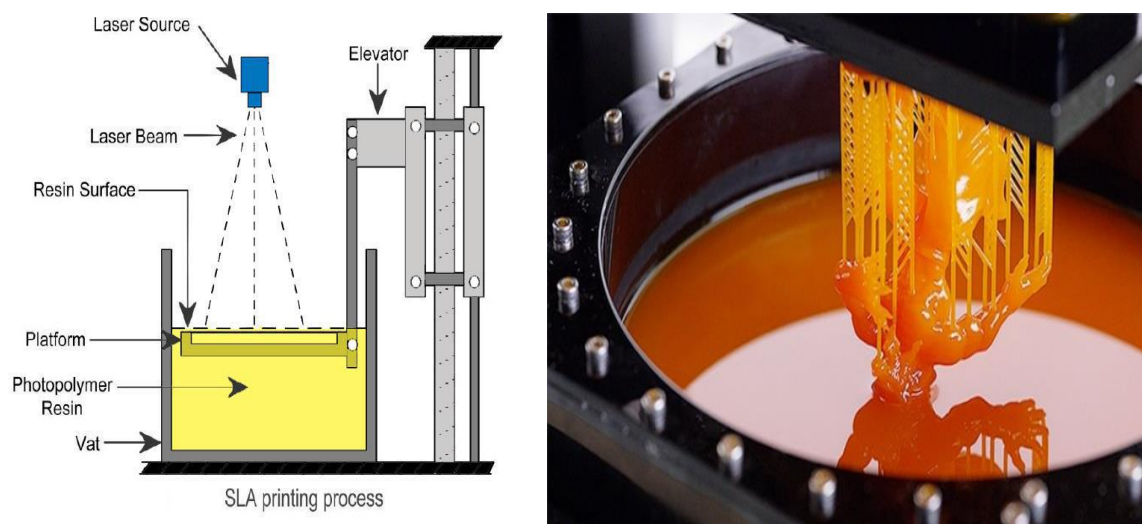


Figure 2 : Illustrations du principe de la photopolymérisation.

La deuxième technologie présentée utilise la technique d'extrusion-dépôt. Celle-ci utilise, pour former les modèles 3D, le principe d'extrusion. Sur les imprimantes de ce type, le matériau imprimable est envoyé à travers une tête d'extrusion qui dirige et dépose le filament de matière en plusieurs couches. Dans le cas des matériaux plastiques, la technologie utilisée se prénomme FDM : « Fused Deposition Modeling ». La tête d'extrusion de l'imprimante sert à chauffer la matière et la fait fondre pour former un filament plastique (Figure 3).

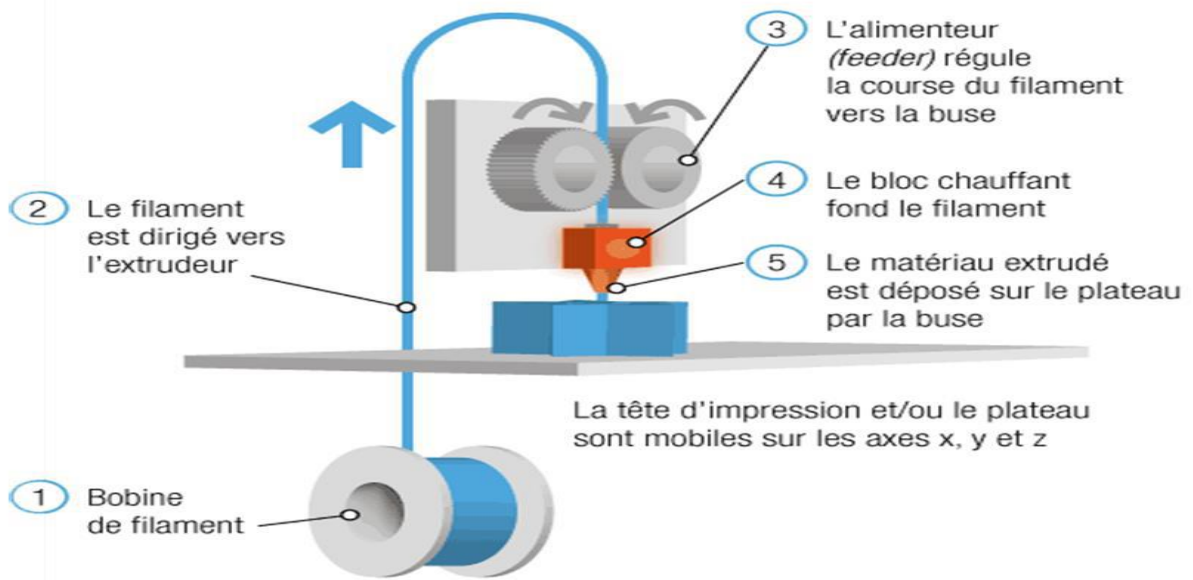


Figure 3 : Illustration du procédé par extrusion/dépôt.

I.1.3 Différents types d'impression 3D :

L'impression 3D a connu un développement remarquable dans les industries aéronautique, médicale et alimentaire [6]. Dans ces secteurs, elle a permis de développer le prototypage rapide.

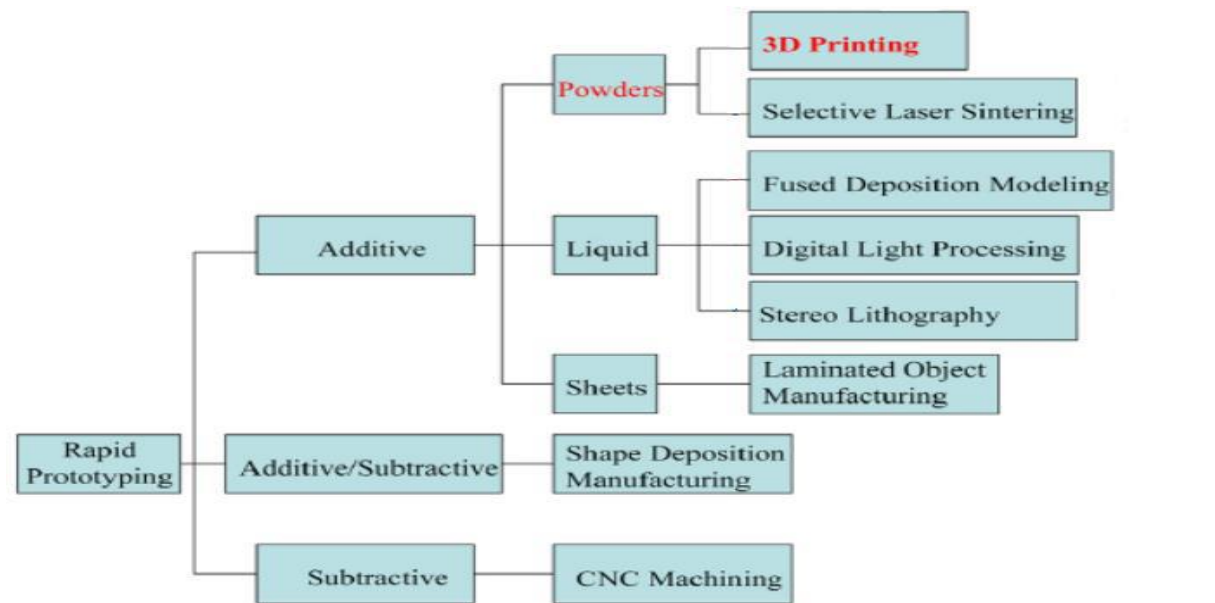


Figure 4 : Différents types de prototypage rapide [7].

Trois grands types de prototypage rapide sont définis :

- additive : consiste de déposer des couches par extrusion à travers une buse d'impression [8].
- subtractive : consiste à enlever la matière excédentaire à partir d'un bloc monolithique [9].
- additive/subtractive : est une combinaison des deux méthodes précédentes en imprimant par la première méthode et éliminant l'excès par la troisième [10].

L'impression 3D dont il est question dans ce projet de fin d'étude est une technique de fabrication additive.

-Trois grands types de fabrication additive de matériaux cimentaires ressortent dans la littérature [11].

	Pegna [14]	Contour Crafting	Concrete Printing	D-Shape
Process	3D Printing	Extrusion	Extrusion	3D Printing
Use of mould	No	Yes (Becomes a part of component)	No	No
Build material	Sand	• Mortar mixture for mould • Cementitious material for build	In-house Printable Concrete	Granular material (sand / stone powder)
Binder	Portland cement (activated by water)	None (Wet material extrusion and backfilling)	None (Wet material extrusion)	Chorline-based liquid
Nozzle diameter	1 mm	15 mm	9–20 mm	0.15 mm
Nozzle number	unknown	1	1	6 300
Layer thickness	unknown	13 mm [21]	6– 25 mm	4–6 mm
Reinforcement	No	Yes	Yes	No
Mechanical properties	Tested with zero degree (0°) of layer orientation, which means the force was given from the top of the printed surface			
Compressive strength	28.30 MPa	unknown	100 110 MPa	235 242 MPa
Flexural strength	14.52 MPa	unknown	12–13 MPa	14–19 MPa
Print size	> 1 m dimension	> 1 m dimension	> 1 m dimension	> 1 m dimension
Pre / Post processing	• Removal of unused material	• Reinforcement per 125 mm vertically • Backfill the mould with a cementitious material per 125 mm height	• Reinforcement after printing	• Compression of the powder for next layer by a roller with light pressure prior to the deposition • Removal of unused material
Pros	• First attempt for freeform construction	• Smooth surface by trowel	• High strengths • Minimum printing process; deposition & reinforcement	• High strengths
Cons	• Massive material placement • Removal of unused material	• Extra process (moulding) • Weak bonding between batches due to segmented backfilling batches by one hour interval	• Limited printing dimension by the printing frame, 5.4 m (L) × 4.4 m (W) × 5.4 m (H)	• Slow process • Rough surface • Limited printing dimension by the printing frame • Massive material placement • Removal of unused material

Tableau 1 : Procédures utilisées dans les différentes méthodes d'impression 3D de matériaux cimentaires[11].

-Les matériaux cimentaires n'étaient pas considérés dans le domaine de l'impression 3D avant Pegna [12] qui a réalisé les premiers essais de fabrication additive.

- *Le Contour Crafting* : est un type de fabrication additive dans lequel une buse portée par un portique se déplace sur deux voies parallèles et peut imprimer des structures complètes [13].

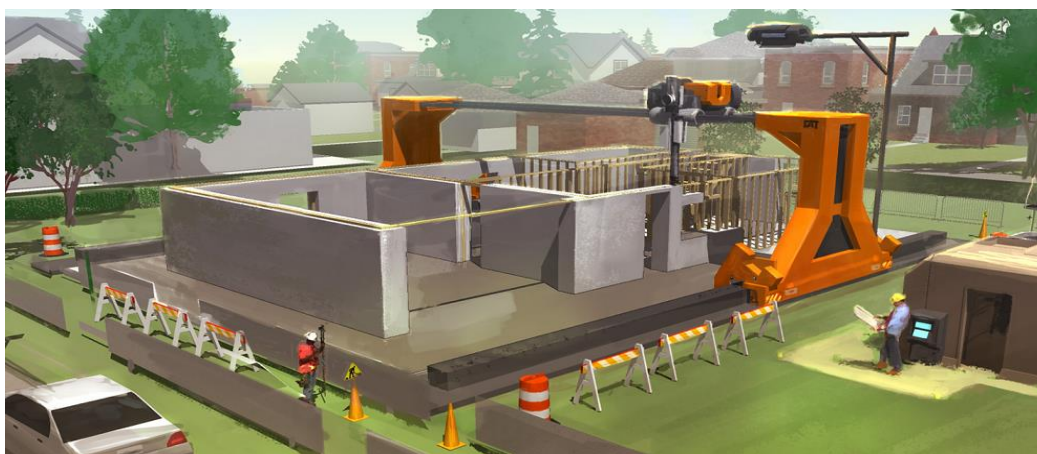


Figure 5 : Les imprimantes 3D de bâtiments Contour Crafting.

- *Concrete Printing* : une technique similaire au « Contour crafting » a été développée À l'Université de Loughborough [11]. Une plus grande liberté d'impression 3D est permise, grâce à la finesse des couches déposées. Ainsi, les géométries internes et externes des éléments imprimés sont mieux contrôlées, le finissage final dépendant étroitement de l'épaisseur des couches.

- *D-shape* : développé par Enrico Dini, des couches de sables sont tout d'abord mises en place et compactées, ensuite la tête d'impression portée par un portique dépose un agent de liaison sur le sable aux endroits où le matériau doit être solidifié pour créer des objets. Ensuite, on dépose une nouvelle couche de sable et on recommence afin de produire l'objet final.[11].



Figure 6 : le système D-shape.

I.1.4 Applications de l'impression 3D aux matériaux cimentaires :

La méthode d'impression la plus utilisée et la plus développée est celle reposant sur le principe d'extrusion/dépôt de la matière. Pionnière dans l'impression des matériaux à base cimentaire, c'est autour de cette méthode que se basera la méthodologie entreprise dans ce rapport[13].

Le procédé d'impression se déroule comme suit : le matériau cimentaire est tout d'abord préparé dans un malaxeur, puis acheminé à l'aide d'une pompe jusqu'à la machine d'impression 3D. Le béton ou le mortier transite au sein de celle-ci jusqu'à la tête d'impression, aussi appelée buse, et est déposé couche par couche sur le support de l'imprimante [14].

La phase de transport de la matière peut différer. Certains chercheurs ont développé l'utilisation d'un réservoir muni d'une vis sans fin placé directement sur la tête d'impression. Cela limite le volume de gâchée possible par rapport à la technique préconisant le pompage[15].

Plusieurs échelles de réalisation sont aujourd'hui possibles, allant de l'échelle laboratoire pour la construction d'éléments de quelques mètres cubes à l'échelle du chantier pour l'édification de constructions de plusieurs étages.

On peut prendre l'exemple de l'entreprise « Construction 3D » basée à Valenciennes, dans le Nord de la France. Celle-ci propose des réalisations relatives au mobilier urbain tels que des bancs imprimés ou des sièges (Figure 7). Les modèles imprimés ont été réalisés en un temps record : un quart d'heure pour un siège et un peu moins d'une heure pour le banc [16].

A cette échelle, on préfère utiliser des bras télescopiques robotisés, auquel est reliée la buse d'impression ainsi que le système d'acheminement du mortier imprimable.



Figure 7 : Mobilier urbain imprimé par l'entreprise "Construction 3D".

L'impression 3D de mobilier urbain de petite taille est en plein développement. Concernant les éléments urbains de plus grande taille, on peut mentionner la construction du premier pont imprimé en 3D dans le monde. Celui-ci a été réalisé début 2017 à Madrid et mesure 12 mètres de long pour 1,75 mètres de large. Celui-ci a été imprimé en huit parties, qui ont ensuite été assemblées entre elles [17]. Depuis, d'autres ouvrages du même type ont vu le jour, notamment en Chine où demeure actuellement le plus grand pont imprimé au monde. Celui-ci a été réalisé en 2019, à partir de 132 blocs imprimés assemblés les uns aux autres, pour une longueur totale de plus de 26 mètres (Figure 8) [18].





Figure 8 : En haut le premier pont imprimé en 3D à Madrid, en bas le plus long pont imprimé du monde en Chine.

Des entreprises ont également utilisé la technologie d'impression 3D pour construire de petites habitations. Un exemple parmi d'autres se tient en Russie. L'ouvrage, modeste, de 37m² a été érigé en 24 heures par la start-up américaine Apis Cor. Les murs et cloisons ont été réalisés en béton par l'imprimante 3D. Les seules interventions humaines consistaient à mettre en place les câblages, l'isolation et la peinture extérieure (Figure 9) [19]



Figure 9 : Habitat imprimé par l'entreprise Apis Cor en Russie. En haut pendant le chantier, en bas lors de la livraison.

Cette construction a coûté à peine plus de 10 000\$ à l'entreprise. Celle-ci estime que l'utilisation de cette technologie d'impression 3D lui a permis d'économiser 70% de coûts par rapport à une construction réalisée de manière traditionnelle.

Enfin, un ouvrage de 640m² a été construit à Dubaï fin 2019 par l'entreprise Apis Cor. Celui-ci représente aujourd'hui le bâtiment le plus imposant construit au monde, tous ses murs ont été imprimés en béton directement sur site, sans étapes d'assemblage (Figure 10) [20].



Figure 10Le plus grand ouvrage imprimé au monde construit par l'entreprise Apis Cor.

I.1.5. Paramètres d'impression :

I.1.5.1. Blocages lors de l'extrusion :

La géométrie du cordon déposé dépend étroitement des dimensions de la buse utilisée. Toutefois, pour une buse particulière, les matériaux utilisés doivent être formulés de manière à éviter les blocages lors de l'extrusion.

Dans l'étude de [21] les granulats utilisés ont une dimension maximale de 2 mm ($D_{max}=2$ mm) et l'imprimante 3D a une buse de 2 cm de diamètre.

I.1.5.2. Impression des couches :

a) Stabilité : La stabilité des couches imprimées de l'élément est liée aux propriétés chimique et rhéologique du matériau lors de l'impression et au processus d'impression (notamment au temps entre les couches imprimées). Les couches imprimées superposées dans le matériau cimentaire n'ont pas un état de durcissement similaire [22]. Par conséquent, l'aptitude à la construction dépend de l'âge de la couche qui affecte sa rigidité. Par exemple, le schéma de (la Figure 11) montre l'âge de durcissement d'un plastique qui est identique tout au long de l'impression et celui des ciments qui varie en fonction du temps tout en imprimant.

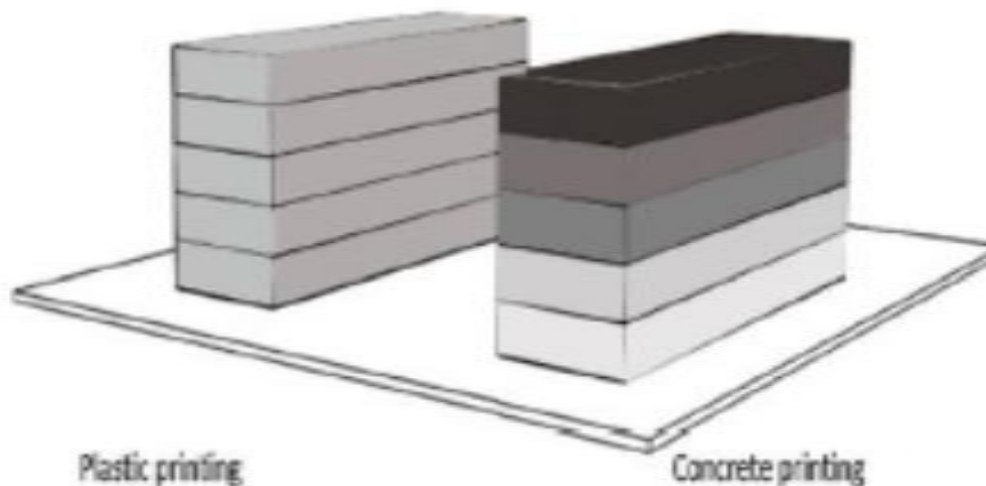


Figure 11 : Différence entre le type des matériaux imprimés[22].

b) Liaisons entre couches : La liaison entre les couches et la maîtrise du traitement et du durcissement du matériau sont des paramètres cruciaux pour la résistance finale du matériau imprimé [23].

Le dépôt de couches n'est pas toujours le même en se déplaçant d'une couche à l'autre. En fait, quatre méthodes différentes peuvent être utilisées en fonction du processus d'impression [22], on présente dans la figure :

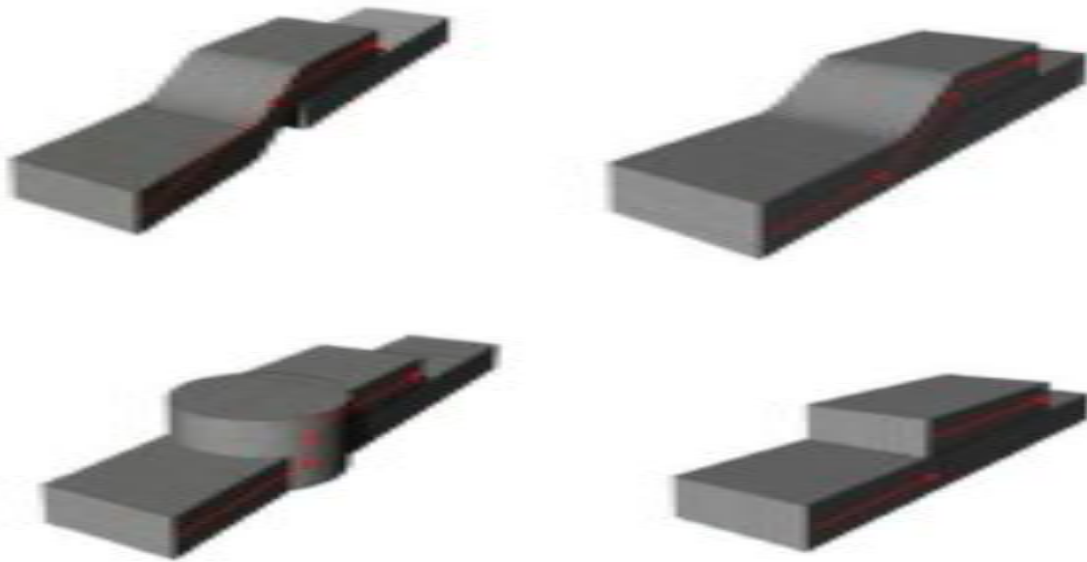


Figure 12 Différentes modes de déposition des couches [22].

Dans la première méthode : la tête d'impression se déplace progressivement vers le haut à partir de la surface d'impression, le mouvement vers le haut étant uniformément réparti sur une majeure partie du plan de dépôt du filament.

La deuxième méthode : est similaire mais le déplacement vertical s'effectue sur une longueur beaucoup plus petite que la première. Cette stratégie est utilisée par Eindhoven University of Technology. puisqu'elle résulte en des couches ayant des zones de discontinuité relativement petites [24].

la troisième méthode, le déplacement vertical s'effectue sans mouvement dans la direction horizontale et résulte ainsi en un dépôt de matériau supplémentaire dans cette zone.

Enfin, un mécanisme d'interruption sophistiqué pourrait permettre l'impression d'une seule couche en arrêtant l'impression verticalement avant de poursuivre la couche suivante. Théoriquement, cela produirait les aspects les plus lisses [22].

I.1.6 Avantages, inconvénients et opportunités apportés par l'Impression 3D :

La fabrication additive a lancé une nouvelle révolution industrielle. En construction, cette méthode est également appelée « Freeform construction » [9]. L'impression 3D présente des caractéristiques technologiques ouvrant de nouvelles opportunités par rapport à la construction traditionnelle présenté dans la tableau suivant :

Opportunities

- + Direct digital manufacturing of 3D product designs without the need for tools or molds
 - + Change of product designs without cost penalty in manufacturing
 - + Increase of design complexity (e.g., lightweight designs or integrated cooling chambers) without cost penalty in manufacturing
 - + High manufacturing flexibility: objects can be produced in any random order without cost penalty
 - + Production of functionally integrated designs in one-step
 - + Less scrap and fewer raw materials required
-

Tableau 2 : Opportunités technologiques de la production additive[25].

a) Avantages :

- Elle vise à briser les limites des architectes en ce qui concerne les formes complexes qu'ils peuvent construire.
- L'impression 3D pourrait réduire les besoins en travail d'assemblage en limitant la construction de formes complexes à un processus en une seule étape.
- La main-d'œuvre et les risques pourraient également être réduits et la procédure de construction facilitée.
- elle permettrait une production souple et peu coûteuse en réduisant l'utilisation d'outils et de moules.
- Et l'impression 3D peut être mise en œuvre pour venir en aide à des millions de personnes dans le monde, notamment en cas de catastrophes naturelles majeures qui entraînent le déplacement de milliers de personnes qui n'attendent qu'un toit pour les protéger.

b) Inconvénients :

Mais, la technologie comporte également des inconvénients et suscite de nombreuses interrogations.

D'une part, la technique n'est pas reconnue comme un véritable procédé de fabrication en termes de codes et normes en vigueur. D'ailleurs, on ne possède pas assez de recul pour déterminer la solidité des bâtiments construits avec une imprimante 3D.

Enfin, les artisans du BTP se posent des questions sur l'avenir de leur profession. Est-ce que les machines et les robots vont les remplacer sur les chantiers de construction ? En fait, l'impression 3D béton n'a pas vocation à remplacer les hommes mais à faire évoluer leur métier. Par exemple, le maçon deviendra opérateur de maçonnerie.

I.2 Rhéologie des matériaux cimentaires :

I.2.1 Variables rhéologiques fondamentales :

Les principales grandeurs utilisées en rhéologie détaillées ici sont : la viscosité, la contrainte de cisaillement ainsi que le vitesse de cisaillement.

Pour un fluide Newtonien, la viscosité dynamique μ [Pa.s] est définie comme le rapport entre la contrainte de cisaillement τ et le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ (Eq. 1).

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{Eq. 1}).$$

La contrainte de cisaillement [Pa] est quantifiée par le rapport d'une force F par une surface S . Lorsque l'on parle de cisaillement, la force est ici définie comme parallèle à la surface S (Eq. 2).

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (\text{Eq. 2}).$$

Le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ [s⁻¹] est quant à lui défini par le rapport $\dot{\gamma}(x,t) = \frac{d\gamma(x,t)}{dt}$

I.2.2 Types de comportements :

Le comportement d'un fluide peut être défini par l'expression de sa contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement appliqué. Sur la (figure 13), les courbes de différents types de fluides sont représentées.

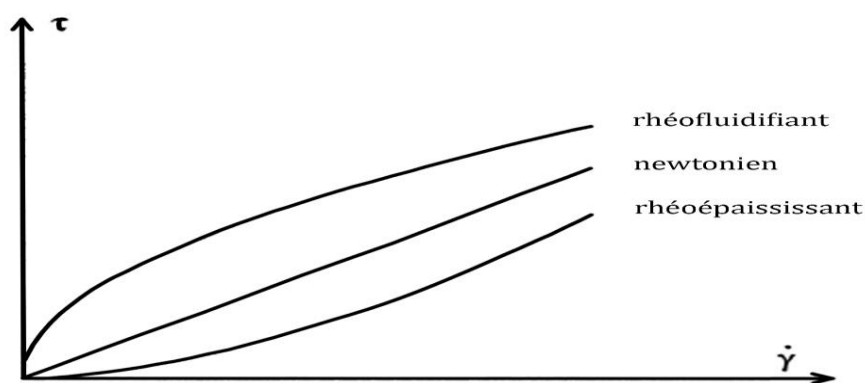


Figure 13 Courbes d'écoulement des fluides exclusivement visqueux.

- Fluide newtonien : sa viscosité est constante et ne dépend pas des forces extérieures qui s'exercent sur lui.
- Fluide rhéofluidifiant : sa viscosité dépend des forces extérieures. Si la force appliquée augmente, la viscosité diminue, on tend vers la fluidification du matériau.

-Fluide rhéoépaississant : on est dans le cas inverse de celui cité précédemment. Ici, si la force appliquée augmente, la viscosité augmente et implique un épaissement du fluide.

Pour ces trois premiers exemples, dès qu'une contrainte est appliquée, quelle que soit sa valeur, la valeur du taux de cisaillement est non-nulle. $\dot{\gamma}$ augmente, linéairement ou non si la contrainte augmente. Ces types de fluides sont appelés « fluides exclusivement visqueux ».

Ce type de comportement n'inclut pas les matériaux cimentaires qui eux sont qualifiés de « fluides à seuil » ou encore « fluides viscoplastiques ». Ceux-ci ont besoin d'une contrainte minimale pour pouvoir s'écouler (Figure 14). Cette contrainte est appelée « seuil d'écoulement » ou « seuil de cisaillement », (« yield stress » en anglais). Celle-ci est notée τ_0 et exprimée en Pascals [26].

A l'état frais, les particules de ciment des mortiers et bétons flocculent en quelques secondes grâce aux forces d'attractions colloïdales. Cela a pour effet la formation d'un réseau de particules capables de résister à une certaine valeur de contrainte et d'afficher un module d'élasticité. Cette résistance est aussi due à la nucléation du CSH. Ce phénomène participe localement à la transformation des interactions colloïdales existant entre les particules de ciment en ponts CSH [27].

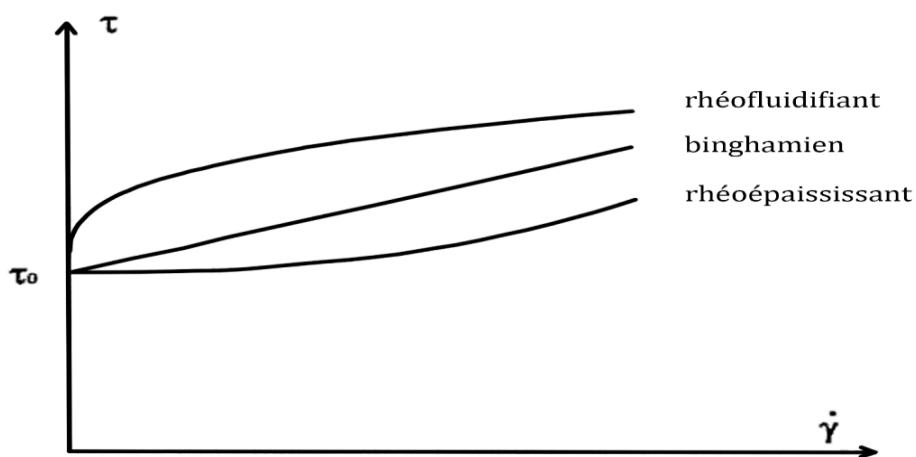


Figure 14 : Courbes d'écoulement fluides viscoplastiques.

Si la contrainte appliquée est inférieure à cette résistance : $\tau < \tau_0$

- La microstructure reste en place et le matériau ne s'écoule pas : $\dot{\gamma} = 0$. On se situe alors dans un domaine où le béton se comporte comme un solide élastique.

Si la contrainte appliquée dépasse la valeur du seuil de cisaillement : $\tau > \tau_0$

- La microstructure se brise et l'écoulement se produit : $\dot{\gamma} > 0$. On passe dans un domaine où le matériau devient fluide est peut-être qualifié de quasi-newtonien [27].

I.2.3 Lois de comportement et notion de seuil de cisaillement :

En dessous de le seuil de cisaillement τ_0 , il est admis que les matériaux cimentaires agissent comme un solide élastique linéaire. Ce type de comportement est important à analyser, notamment dans l'application des matériaux cimentaires à la technologie d'impression 3D.

Au-delà de le seuil de cisaillement, le matériau cimentaire voit ses propriétés rhéologiques modifiées et commence à s'écouler. Plusieurs modèles ont été réalisés pour caractériser le comportement de ces fluides dits « viscoplastiques ». Un des modèles les plus répandus est celui de Bingham (1922) (Eq. 3).

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (\text{Eq. 3})$$

Dans cette équation τ représente la contrainte de cisaillement [Pa], τ_0 le seuil de cisaillement [Pa], μ la viscosité [Pa.s] et $\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement [s⁻¹]. On vérifie bien que lorsque l'écoulement à lieu, donc lorsque $\dot{\gamma} > 0$, la contrainte de cisaillement est supérieure au seuil de cisaillement : $\tau > \tau_0$. De plus, le comportement d'un fluide newtonien est un cas particulier de la loi de Bingham pour lequel $\tau_0 = 0$.

-le modèle de Herschel-Bulkley (1926) est aussi grandement utilisé pour caractériser les matériaux cimentaires. Il énonce également l'hypothèse que le comportement d'un matériau cimentaire n'est pas forcément linéaire.

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (\text{Eq. 4})$$

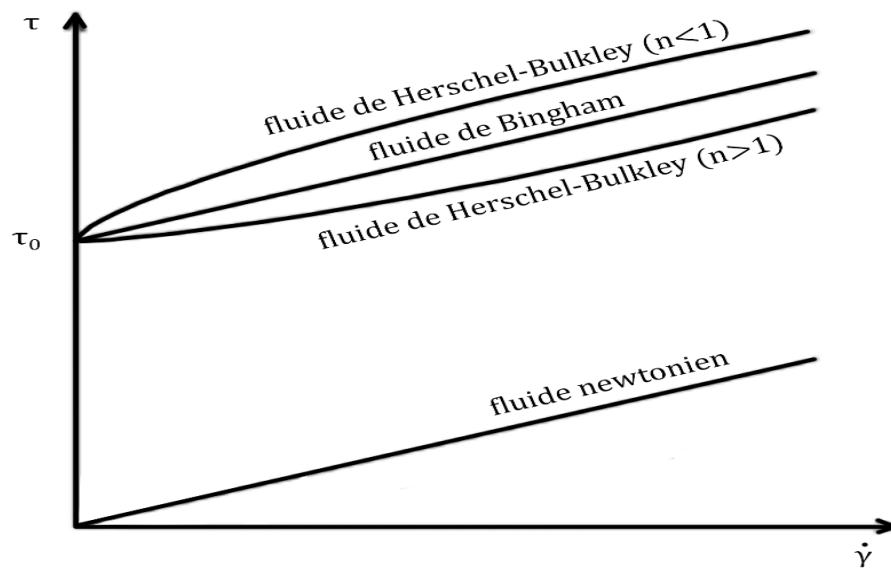


Figure 15 : Courbes d'écoulements associées aux modèles rhéologiques courants.

Dans ce modèle, K est l'indice de consistance que l'on peut aussi appeler viscosité de Herschel-Bulkley [Pa.s] et n représente l'indice de cisaillement (Figure 15).

- Lorsque $n=1$, on revient sur un modèle de type Bingham.
- Pour $n>1$, le fluide aura un comportement de type rhéoépaississant (rare).
- Pour $n<1$, le fluide aura un comportement de type rhéofluidifiant.

I.2.4 Le seuil de cisaillement :

plusieurs appellations peuvent être utilisés pour désigner le seuil de cisaillement parmi lesquelles : le seuil de cisaillement, le seuil de plasticité, le seuil de rigidité, la contrainte seuil ou encore le point de fluage. Le seuil de cisaillement (τ_0) [Pa] est la contrainte de cisaillement minimale nécessaire pour initier l'écoulement d'un matériau.

On peut définir deux types de seuil de cisaillement selon que le matériau cisailé est initialement au repos ou en écoulement. Le seuil de cisaillement dynamique correspond à la contrainte minimale pour que l'écoulement du matériau s'arrête. Le seuil de cisaillement statique correspond à la contrainte de cisaillement minimale pour qu'un matériau initialement au repos puisse s'écouler.

Le seuil de cisaillement statique peut être mesuré en appliquant au matériau une faible vitesse de déformation constante. La contrainte de cisaillement augmente progressivement jusqu'à atteindre un pic, considéré comme le seuil de cisaillement statique.

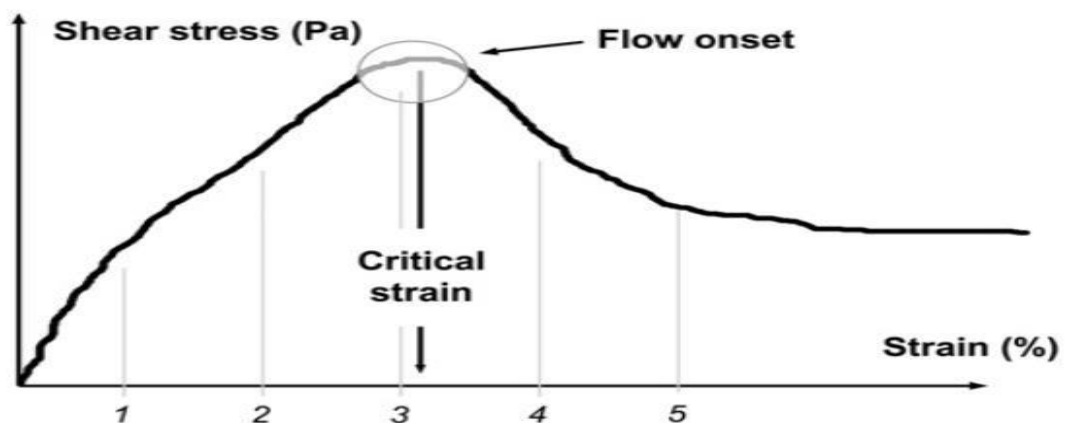


Figure 16 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la déformation[28].

La majorité des matériaux cimentaires ont une capacité à supporter une valeur de cisaillement déterminée avant de s'écouler. Cette valeur, correspondant au seuil de cisaillement est attribuée à la valeur de contrainte appliquée qui est plus grande que celle que les particules en interaction peuvent supporter[29].

Roussel indique que les comportements rhéologiques transitoires des pâtes de ciments, des mortiers et des bétons sont similaires [30].

Ainsi, la pâte de ciment est la seule source potentielle de la thixotropie et le seuil de cisaillement représente la structure et la force du réseau des particules de ciment [31].

I.2.5 Notion de thixotropie :

La thixotropie est une variation réversible de la viscosité lorsqu'un fluide est soumis à une sollicitation. La viscosité des fluides diminue d'abord avec le temps lorsqu'une contrainte constante leur est appliquée. Cependant, dès que la contrainte appliquée est annulée, la viscosité du matériau augmente de nouveau jusqu'à atteindre sa valeur d'origine au bout d'un certain temps. Ce comportement s'interprète par des changements de structures internes du fluide voir une destruction progressive de cette microstructure. La modification résulte alors de la compétition entre les forces hydrodynamiques (qui détruisent la microstructure) et les forces de cohésion et le mouvement brownien (qui reforment la microstructure)[32].

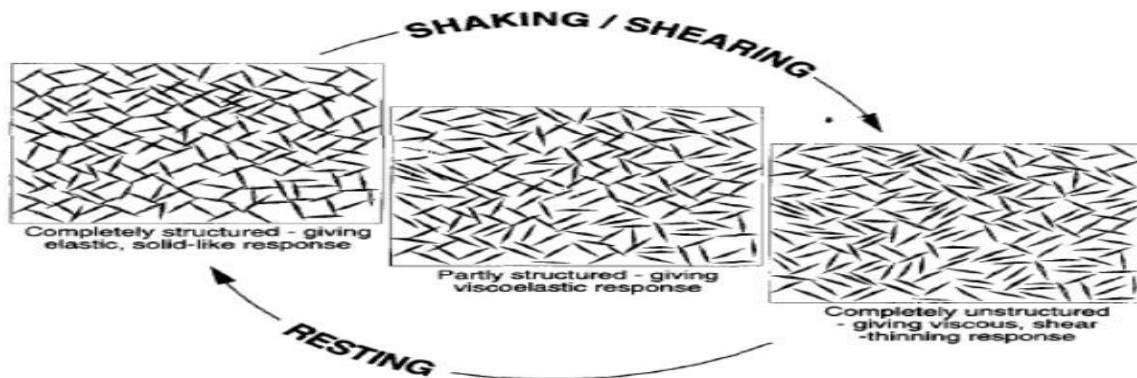


Figure 17 : Schéma du comportement thixotrope [32].

I.2.5.1. Modélisation de la thixotropie :

Billberg [33] et Ovarlez et Roussel [34] montrent que le seuil de cisaillement statique augmente avec le temps au repos.

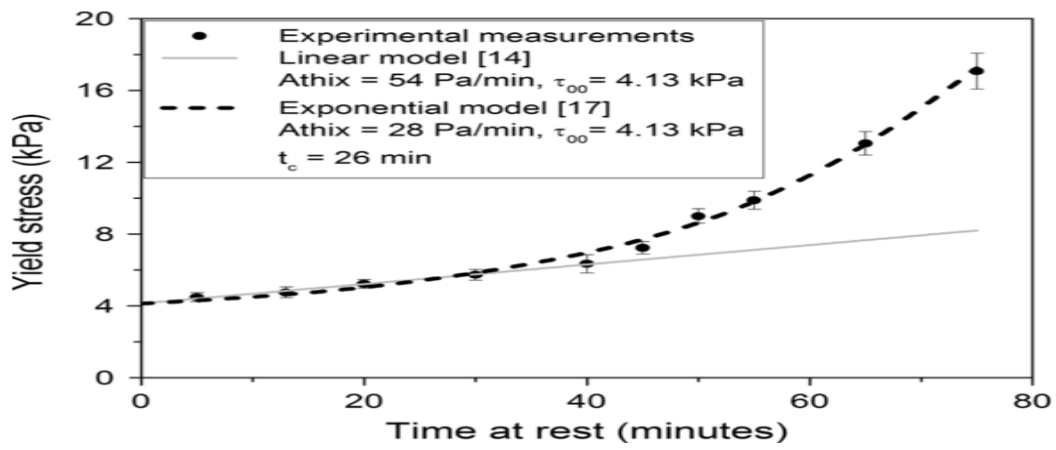


Figure 18 : Comparaison de l'évolution du seuil de cisaillement entre le modèle de Roussel et celui de Perrot [33].

D'après Roussel [30], la thixotropie peut être considérée sur une courte période de maximum 30 minutes au cours de laquelle les aspects irréversibles de la structuration peuvent être ignorés.

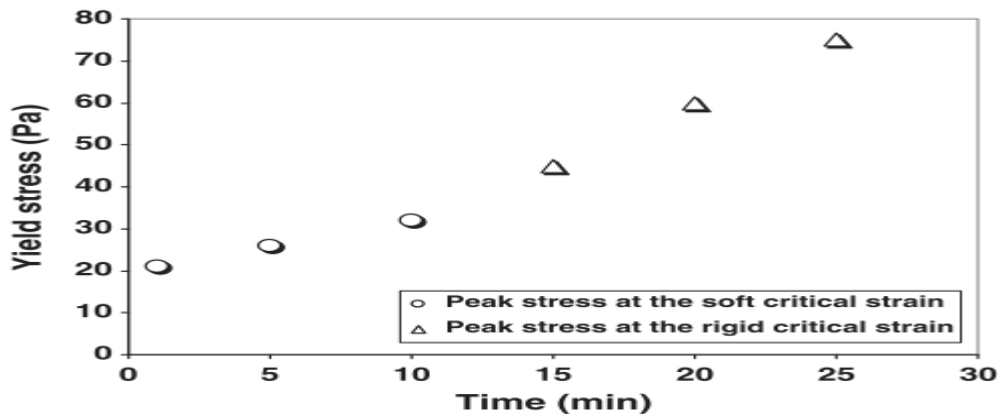


Figure 19 : Evolution du seuil de cisaillement au cours du temps d'une pâte de ciment OPC[28].

Au cours des trente premières minutes, l'évolution du seuil de cisaillement avec le temps peut être considérée comme linéaire.

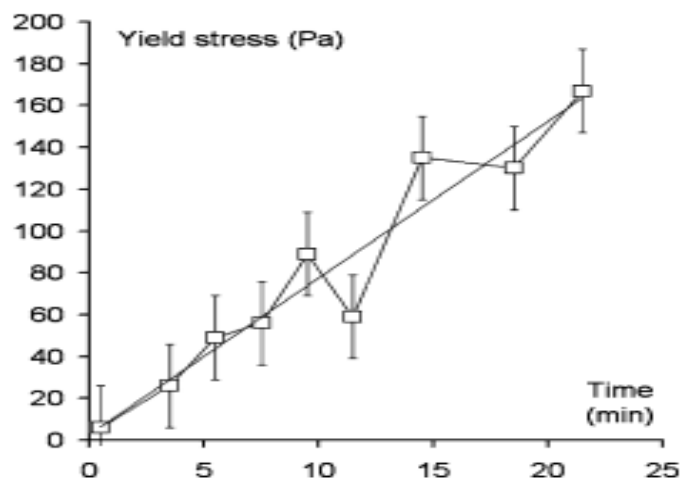


Figure 20 : Exemple de l'évolution du seuil de cisaillement au cours du temps à l'aide d'un rhéomètre à béton BTRheom [34].

Roussel [30] définissent le taux de structuration A_{thix} comme le taux constant d'augmentation du seuil de cisaillement en fonction du temps de repos selon (Eq. 1)

$$\tau(t) = A_{thix}t + \tau_{0,0} \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec : $\tau_{0,0}$ le seuil de cisaillement du matériau au temps zéro au repos.

après plusieurs mesures sur différents BAP. En comparant la valeur initiale du seuil ($\tau_{0,0}$) à l'évolution du seuil de cisaillement dans le temps $\tau_{0,0}$ peut être considéré comme négligeable (la figure I.19).

$$\tau(t) = A_{thix}t \quad (\text{Eq. 2})$$

Perrot [35] met l'accent sur le taux de structuration A_{thix} et son influence sur la caractérisation des matériaux cimentaires dans la construction additive. Ils proposent une contrainte d'écoulement exponentielle correspondant à l'accélération du seuil de cisaillement due à l'augmentation non linéaire de la fraction volumique solide de la pâte de ciment telle que présentée par (Eq. 3).

$$\tau(t) = (e^{t_{rest}/t_c} - 1) + \tau_{0,0} \quad (\text{Eq. 3})$$

Avec : t_c : un temps caractéristique.

$\tau_{0,0}$: la contrainte de cisaillement.

t_{rest} : égale à 0.

dont la valeur est fixée pour obtenir le meilleur ajustement avec les valeurs expérimentales [33], présenté dans (la figure 17).

I.2.6 Méthodes d'essais empiriques sur béton frais :

De nombreuses méthodes d'essai ont été créées et développées afin de pouvoir fournir une analyse et une description rhéologique du béton frais. Les essais présentés dans la partie suivante ne forment pas une liste exhaustive. On se concentre sur ceux les plus utilisés de nos jours.

I.2.6.1 Essai d'affaissement au Cône d'Abrams :

Cet essai normé [NF EN 12350-2] est l'un des plus courants afin d'évaluer la consistance des bétons. Le but de l'essai est de mesurer l'affaissement d'un échantillon de béton. Un faible affaissement correspond à un béton ferme, un affaissement important correspond à un béton fluide.

Le mode opératoire est le suivant :

- Le cône d'Abrams est placé sur une plaque en acier galvanisé
- Le cône est rempli de béton frais en trois phases. À chaque fois, chaque couche est piquée à 25 reprises à l'aide d'une tige d'acier lisse de diamètre 16mm à extrémité arrondie
- Le cône est ensuite arasé à l'aide d'une tige ;
- Immédiatement après, le cône est soulevé verticalement et doucement en le tournant un peu pour le démouler

- L'affaissement, qui est la distance entre le sommet du cône et le sommet du béton frais, est mesuré.

Le cône a les dimensions représentées sur (la figure 21). Si le béton présente un affaissement supérieur à 220mm, il est judicieux de s'orienter vers un test mesurant l'étalement du béton. C'est en général l'essai utilisé pour les bétons autoplaçants. A partir de l'affaissement mesuré, la classe de consistance du béton peut être déterminée (Figure 21).

Consistance	Classe	Affaissement (mm)
Très ferme	S1	10-40
Ferme	S2	50-90
Plastique	S3	100-150
Fluide	S4	160-210
TrèsFluide	S5	>220

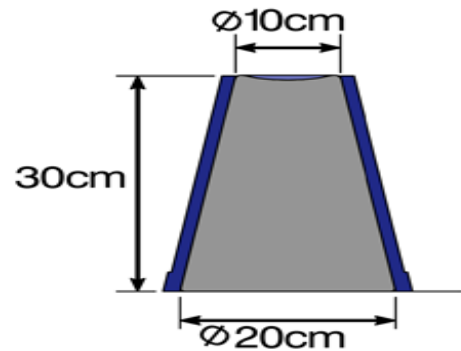


Figure 21 : Dimensions du cône utilisé et classes de consistances.

I.2.6.2 Essai d'étalement au Cône d'Abrams:

Comme dit précédemment, cet essai normé [NF EN 12350-8] est dérivé de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams. Il est utilisé pour caractériser la rhéologie des bétons autoplaçants. Le cône utilisé est identique, le mode opératoire et les valeurs mesurées sont différents.

Le protocole est le suivant :

- › Le cône d'Abrams est maintenu sur une plaque en acier galvanisé.
- › Le cône est rempli de béton frais et ensuite arasé avec une tige.
- › Immédiatement après, celui-ci est doucement soulevé de 4cm selon l'axe vertical, en le tournant un peu pour faciliter le démoulage.
- › Le béton fluide s'affaisse et s'étale sur la plaque
- › Le diamètre le plus grand ainsi que son diamètre perpendiculaire sont mesurés.

L'étalement est la moyenne des deux diamètres mesurés, ces deux diamètres ne devant pas être différents de plus de 5 centimètres. Notons que les deux essais mentionnés ici sont utilisés pour des matériaux cimentaires ayant des comportements rhéologiques différents. D'un côté, on caractérise un régime d'affaissement pour des bétons relativement fermes et visqueux. D'un autre côté, on s'oriente plus vers un régime d'étalement pour des matériaux plus fluides.

I.2.6.3 Essai d'étalement à la table à chocs:

Cet essai normé [NF EN 12350-5] mesure aussi un étalement mais mis en œuvre cette fois par vibration. Un cône est utilisé comme contenant pour le béton mais aura des dimensions différentes du cône d'Abrams.

Le protocole est le suivant :

- › La table à secousses est humidifiée avec l'eau de gâchage
- › Le cône est alors placé au centre et est rempli de béton frais en deux fois. Chaque couche est tapotée dix fois.
- › Après trente secondes d'attente, le cône est soulevé et le béton s'étale sur la table.
- › La table à secousses est levée à une hauteur de quarante millimètres puis laissée tombée quinze fois au rythme d'une secousse par seconde.
- › Le diamètre le plus grand ainsi que son diamètre perpendiculaire sont mesurés. L'étalement est la moyenne des deux diamètres mesurés et celui-ci est assimilé à une classe de consistance décrite dans le tableau ci-dessous (Figure 18) [NF EN 206].

Consistance	Classe	Étalement (mm)
Ferme	F1	<340
Plastique	F2	350-410
Mou	F3	420-480
Très Mou	F4	490-550
Fluide	F5	560-620
TrèsFluide	F6	630-700



Figure 22 : Matériel utilisé pour l'essai d'étalement et classes de consistances.

I.2.7 Méthodes d'essai au rhéomètre :

Afin de caractériser la viscosité, la courbe d'écoulement et des grandeurs comme le seuil d'écoulement, il est possible d'avoir recours à l'usage de rhéomètres.

Le rhéomètre ICAR est un instrument portable et robuste pour mesurer les propriétés d'écoulement fondamentales (rhéologiques) du béton frais. L'instrument a d'abord été développé au Centre international de recherche sur les agrégats (ICAR) situé à l'Université du Texas à Austin, puis par German Instruments pour répondre au besoin d'une méthode permettant de caractériser le véritable comportement d'écoulement des mélanges de béton. Les méthodes traditionnelles de mesure de l'affaissement ou de l'affaissement ne sont pas capables de caractériser les propriétés rhéologiques fondamentales du béton qui existent pendant les processus de mélange, de transport et de mise en place. En conséquence, la véritable performance des mélanges de béton innovants ne peut pas être mesurée avec ces méthodes traditionnelles basées sur l'affaissement.

Le rhéomètre ICAR fournit, pour la première fois, un instrument peu coûteux et simple à utiliser qui peut être utilisé pour:

- Recherche et développement pour caractériser l'influence de nouveaux matériaux sur la rhéologie du béton.
- Optimiser les proportions du mélange afin que le béton résultant s'écoule facilement mais résiste à la ségrégation (particulièrement important pour le béton auto-consolidant).
- Contrôle qualité sur site.

Principe :

Le béton frais peut être considéré comme un fluide, ce qui signifie qu'il s'écoulera sous l'action de contraintes de cisaillement. Le comportement d'écoulement du béton peut être représenté par la relation à deux paramètres suivante:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$$

qui est connue sous le nom de **modèle de Bingham**: le paramètre τ_0 est la **limite d'élasticité**, et il représente la contrainte de cisaillement nécessaire pour initier l'écoulement. La pente de la ligne est la **viscosité du plastique**, μ , et elle affecte la résistance à l'écoulement une fois que la limite d'élasticité a été dépassée. Ces deux paramètres, qui définissent la courbe d'écoulement, fournissent une description complète du comportement d'écoulement d'un fluide.

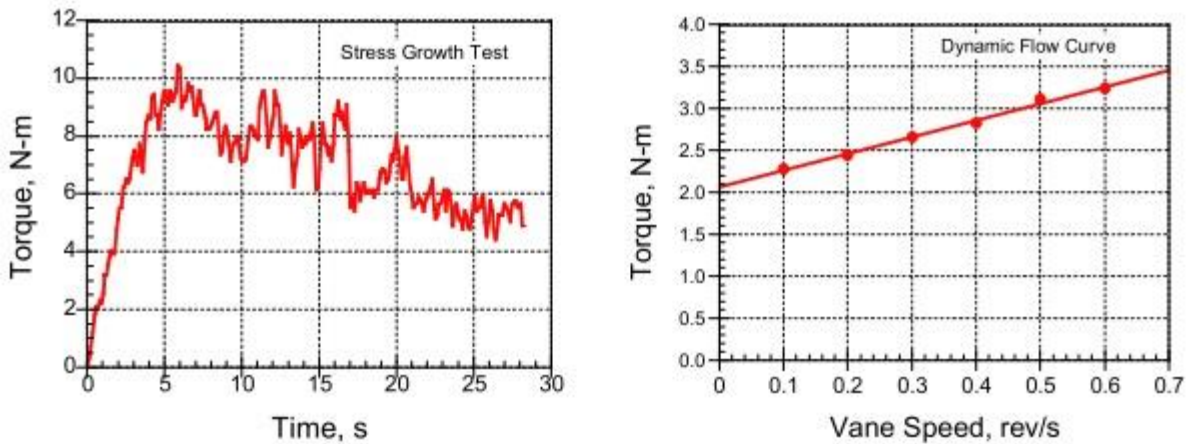
Mode opératoire :

Le rhéomètre ICAR est composé d'un conteneur pour contenir le béton frais, une tête d'entraînement qui comprend un moteur électrique et un compteur de couple; une palette à quatre pales qui est tenue par le mandrin sur le conducteur; un cadre pour fixer l'ensemble conducteur / palette au sommet du conteneur; et un ordinateur portable pour faire fonctionner le pilote, enregistrer le couple pendant le test et calculer les paramètres de la courbe d'écoulement. Le conteneur contient une série de tiges verticales autour du périmètre pour éviter le glissement du béton le long de la paroi du conteneur pendant le test. La taille du conteneur et la longueur de l'arbre à aubes sont sélectionnées en fonction de la taille maximale nominale de l'agrégat. Le diamètre et la hauteur de l'aube sont tous deux de 127 mm.

Deux types de tests sont effectués. Le premier type est un **test de croissance de contrainte** dans lequel la palette est tournée à une vitesse lente constante de 0,025 tr / s. L'augmentation initiale du couple est mesurée en fonction du temps. Le couple maximal mesuré lors de cet essai est utilisé pour calculer la **limite d'élasticité statique**. L'autre type d'essai est un **essai de courbe d'écoulement** pour déterminer la **limite élastique dynamique** et la **viscosité plastique**. Le test de la courbe de débit commence par une période de «claquage» au cours de laquelle la palette tourne à la vitesse maximale. Ceci est fait pour décomposer toute structure thixotrope qui peut exister et pour fournir un historique de cisaillement cohérent avant de mesurer les paramètres de Bingham. La vitesse de la palette est ensuite diminuée selon un nombre spécifié d'étapes, qui est sélectionné par l'utilisateur, mais au moins six étapes sont recommandées. Lors de chaque étape, la vitesse des

palettes est maintenue constante et la vitesse moyenne et le couple sont enregistrés. Le graphique du couple en fonction de la vitesse de rotation des palettes définit la **courbe d'écoulement** à partir de laquelle les paramètres de Bingham sont calculés.

Exemple de résultats :



La figure à gauche montre les résultats d'un test de croissance de stress. Le programme utilise le couple de pointe et la géométrie d'essai pour calculer la limite d'élasticité statique, qui est affichée au bas de l'écran de l'ordinateur. La figure de droite montre le couple moyen par rapport à la rotation moyenne des palettes mesurée pendant six étapes du test de la courbe de débit. Le logiciel calcule une ligne de meilleur ajustement aux données et signale l'intersection et la pente en tant que paramètres relatifs. Sur la base de la géométrie du test, le logiciel calcule les paramètres de Bingham: limite élastique dynamique et viscosité plastique.

I.3 Comportement des matériaux cimentaires imprimés par la technique d'extrusion/dépôt :

I.3.1 Problématiques rhéologiques :

Cette étude poussée de la rhéologie des matériaux cimentaires est fondamentale dans la mesure où le comportement rhéologique du béton ou du mortier est déterminant lors du processus d'impression 3D par extrusion/dépôt.

En effet, lorsque l'on imprime avec cette technique, il est nécessaire que le matériau présente des caractéristiques particulières. D'une part, il doit être suffisamment fluide et maniable pour pouvoir être acheminé jusqu'à l'imprimante, tout en gardant sa cohésion et ne pas ségréguer. D'autre part, il doit être suffisamment ferme pour pouvoir soutenir son propre poids, celui des autres couches lors de l'impression et rester peu déformable.

Deux critères sont alors nommés et identifiés : l'extrudabilité et la constructibilité. [36][37].

Plus un béton sera fluide, plus il sera pompable. En revanche, celui-ci risque de ne pas supporter le poids des couches imprimées en raison de sa haute capacité d'affaissement ou d'étalement. Un béton ferme lui, résistera davantage aux charges mentionnées précédemment, mais présentera une bien moins bonne maniabilité et risque d'être difficilement pompable.

Cela met en lumière toute la problématique de la composition et la formulation de tels matériaux. Il est nécessaire de trouver un juste équilibre dans les performances du matériau afin que les deux propriétés d'extrudabilité et de constructibilité soient simultanément satisfaites.

I.3.2 Principes physiques de pompage et d'extrusion :

La phase de pompage du matériau implique que celui doit avoir une consistance relativement fluide. Pour quantifier ceci en termes de variables physiques, on peut utiliser les grandeurs telles que la viscosité du matériau ou son seuil de cisaillement. Plus ces variables présentent une valeur élevée, plus le matériau est ferme et difficilement pompable. Il s'agit donc d'adapter la puissance de la machine de pompage en fonction des propriétés de la formulation à l'état frais et inversement.

De plus, la dimension des matériaux utilisés dans la composition des matériaux cimentaires à son importance. Ceci concerne notamment les composants comportant des éléments de grande taille (sables/granulats). Ils ne doivent en effet pas dépasser un diamètre fixé en fonction des caractéristiques dimensionnelles de l'organe de pompage, de la conduite mais aussi de l'imprimante 3D elle-même [14].

Physiquement, lors du transit du matériau dans la conduite, il a été démontré que son écoulement était rendu plus facile par la formation d'une couche lubrifiante se trouvant à l'interface entre la paroi de la conduite et le matériau lui-même. Cette couche est constituée des matériaux de la pâte de ciment présentant un seuil de cisaillement plus faible que l'ensemble du matériau cimentaire. Le reste du matériau fait l'objet d'un écoulement de type « bouchon » (Figure 23) [38].

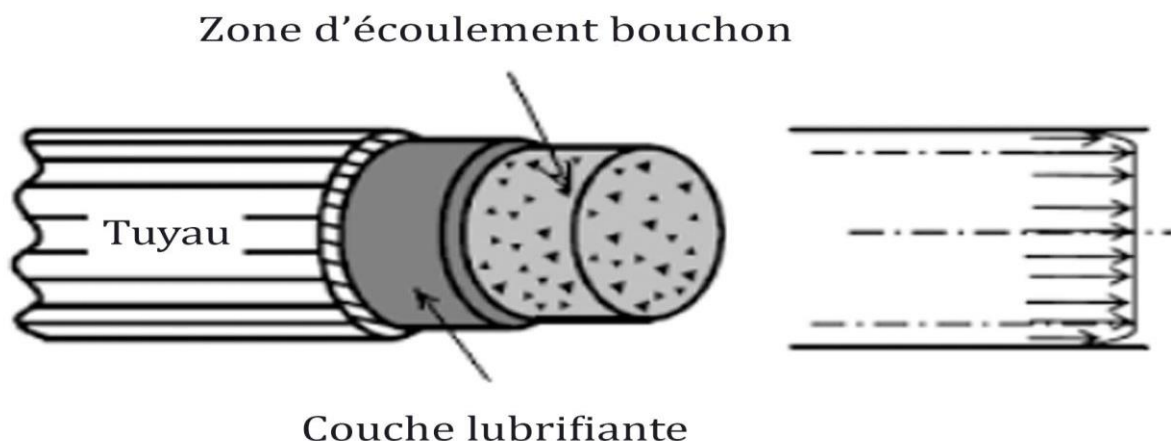


Figure 23 : Schéma de lu principe d'écoulement et gradient des vitesses.

La phase d'extrusion concerne l'acheminement du matériau dans sa phase finale, juste avant son dépôt sur le support d'impression. L'écoulement est étudié non plus dans la conduite dans laquelle est transporté le béton mais dans la tête d'impression, aussi appelée buse. Le régime d'écoulement est sensiblement le même que décrit précédemment avec la formation d'une couche lubrifiante à l'interface avec la paroi de « l'extrudeur ». C'est dans cette zone que le cisaillement est concentré tandis que dans la zone bouchon la contrainte de cisaillement est quasi-nulle [14].

En sortie de l'extrudeuse, si on prend l'exemple d'une géométrie simple (Figure 24), on peut distinguer trois zones où le comportement du matériau sera différent.

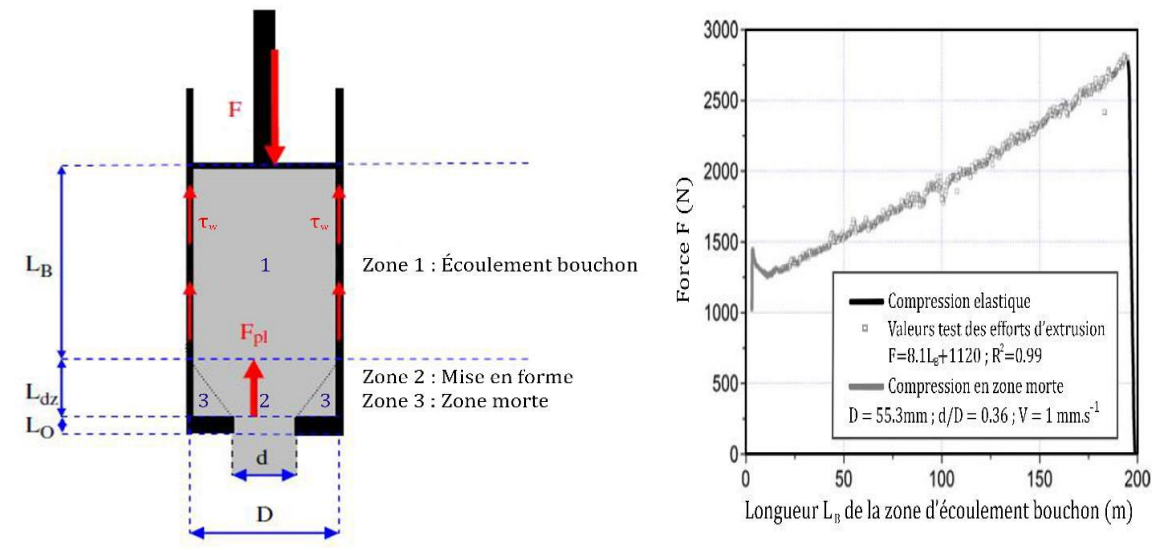


Figure 24 : Schéma du principe d'écoulement en sortie de l'extrudeuse et graphique présentant l'évolution de la force nécessaire à l'écoulement du matériau cimentaire [39].

- La zone 1 concerne ce qui a été mentionné précédemment, elle représente un écoulement de type « bouchon » dans le corps de l'extrudeuse.
- La zone 2 représente la zone de mise en forme, où la section de la conduite diminue jusqu'à la valeur de section finale de mise en forme.
- La zone 3 peut être assimilée à une zone « morte » où le matériau reste bloqué. Celle-ci peut-être plus ou moins importante en fonction de la géométrie donnée au rétrécissement de section.

Il est admis de diviser en deux composantes l'effort d'extrusion. Une première composante caractérisant l'effort nécessaire pour mettre en forme le matériau et une deuxième prenant en compte les efforts de frictions à l'interface entre le matériau et la paroi de l'extrudeur.

L'effort de mise en forme, noté F_{pl} est associé à la contrainte nécessaire à appliquer lorsque la zone en écoulement bouchon se vide ($L_B=0$). Lorsque L_B est différente de zéro, l'effort de friction F_{fr} est non nul et s'ajoute à l'effort de mise en forme. Plus la longueur de matériau à extruder est importante, plus l'effort de friction sera élevé, augmentant ainsi la valeur de l'effort total d'extrusion à fournir.

Certaines études ont suggéré que la pression de mise en écoulement pouvait être liée au seuil d'écoulement du matériau, à sa vitesse d'écoulement ainsi qu'aux dimensions géométriques de l'extrudeur [40].

Il est recommandé, afin de garder une bonne extrusion, d'avoir un écoulement non frottant et donc d'avoir une composition favorisant la formation d'une couche lubrifiante. Pour satisfaire cette exigence, il est recommandé lors de la formulation de limiter la fraction volumique solide à 80% du volume total. Des impressions de matériaux avec des seuils d'écoulement de plus de 1 kPa ont ainsi pu être réalisées. Concernant l'étape d'extrusion, les contraintes peuvent atteindre ces valeurs [14].

Un autre aspect auquel il faut prêter attention est lié au drainage du fluide interstitiel du matériau cimentaire. Dans certains cas, la contraction de l'écoulement peut provoquer l'apparition d'une perte de charge entraînant ce type de drainage. Celui-ci peut à terme entraîner une baisse de la maniabilité, le matériau devenant plus frottant, cela pouvant conduire à l'apparition de défauts en surface des couches imprimées [41].

I.3.3 Formulation de mortiers imprimables :

Il existe aujourd'hui quelques règles de bonnes pratiques concernant l'élaboration des mortiers imprimables. La première a été citée précédemment et concerne la fraction volumique solide, qui ne doit pas dépasser 80% de l'ensemble du volume total. Les compositions présentées dans la littérature utilisent en général du sable ayant une granulométrie comprise entre 0 et 3mm, suffisamment fin pour éviter les problèmes d'obstruction dans les buses d'imprimantes [14].

Le rapport eau/ciment dans ce type de mortier est en général relativement faible (entre 0,2 et 0,45) [14] [42] [43]. Cela a des conséquences sur la rhéologie du mortier étant donné que de tels rapports impliquent une certaine fermeté du matériau. Celui-ci est donc peu maniable mais possède une viscosité et un seuil de cisaillement élevé. Dans le cas de l'impression par extrusion/dépôt, cela est un atout car le matériau doit pouvoir présenter une bonne résistance mécanique afin de supporter son propre poids et celui des couches supérieures. En revanche, ce critère ne favorise pas la bonne maniabilité du mortier ou du béton.

Le rapport sable/liant est également une donnée ressortant souvent dans les études réalisées sur la composition des mortiers imprimables. Celui-ci est en général compris entre 1 et 2,3. Un ratio se situant autour de 1,5 a été considéré comme optimal [44].

Il est nécessaire d'optimiser la rhéologie d'un tel matériau, de le rendre plus ouvrable afin qu'il puisse être pompable dans le mécanisme de l'imprimante 3D. Pour cela, les superplastifiants sont souvent utilisés dans des proportions comprises entre 0,05 et 2% de la masse de ciment [45][46]. D'autres études ont utilisé des adjuvants modificateurs de viscosité. Ceux-ci servent à augmenter la viscosité et le seuil d'écoulement des matériaux cimentaires et peuvent ainsi participer à leur stabilité à l'état frais. [42].

Quelques exemples de matériaux testés en impression 3D, leurs compositions, leurs propriétés rhéologiques et mécaniques et les machines utilisées pour leurs impressions sont présentés dans le (Tableau I.3). Ce tableau montre que la plupart des mélanges sont réalisés à base de ciment portland. Les autres composants comme les cendres volantes, la fumée de silice, les accélérateurs, les retardateurs ou d'autres adjuvants sont utilisés pour régler le comportement rhéologique et la prise des matériaux à imprimer. Des études ont déterminé des intervalles du seuil de cisaillement et de viscosités pour lesquels l'extrudabilité des matériaux est favorisée. Par exemple, des seuils de cisaillement compris entre 0,27 et 0,7 KPa et des viscosités comprises entre 30 et 40[Pa.s] sont mesurés pour un mortier de géopolymère développé par [47]. Les matériaux et les machines utilisés ainsi que les diamètres de buses et les vitesses d'impression variables ont montré leur influence sur le diamètre du filament. Ainsi, le diamètre des couches imprimées peut être plus large que celui de la buse selon le débit d'extrusion. Les résistances à la compression sont affectées par la direction d'impression par rapport à la direction de la force appliquée. Ces valeurs varient entre 20 MPa et 56 MPa dans les exemples présents dans le (Tableau I.3). [48].

Ref.	Yield stress (kPa)	Plastic viscosity (Pa.s)	nozzle (mm)	filament (mm)	Speed	Compressive strength (Mpa)*	Material	Machine
(Panda <i>et al.</i> , 2018)	0.6-1	30-40	-	20x20, 30x15	80mm/s	25	class F fly ash, Ground granulated blast-furnace slag, Alkaline reagent, River sand	grout screw pump and a 4-axis gantry concrete printer
(Zhang <i>et al.</i> , 2018)	0.7-1.8	3.5-4.5	20	22-24	8000 mm/min		Tap-water, type II 52.5 PC, nano clay, SF	3D printing concrete machine(3.8x2.7x2.8 m frame) with mobile platform along the Z and Y axis
https://d-shape.com/	-	-	-	2.5-5	1-5 cm/hour	33-37	granular material and fibers with diam= 0.1-4 mm, Ink binder	
(Malaeb <i>et al.</i> , 2015a)	-	-	20	-	18.76 cm/sec	40-56	Aggregates of Dmax= 2mm, cement type I, superplasticizer, accelerator, retarder	tri-axial plane (x-y-z) 3D printer
(Bao <i>et al.</i> , 2018)			8	10	5-10 mm/s	25-43	Type 1 PC, CAC, fly Ash, silica fume, silica sand, flour silica, PVA fiber, VMA, HRWR, TiO2, ANC	manual : caulk gun
(Marchment and Sanjayan, 2018)	-	-	25x25	25	12mm/s	20	GP, OPC, sand type 11(16/30) sand type 2 (30/60), retarder/ viscosity modifying agent/ slump retainer	custom-made 3D printer with 45 degree nozzle with rectangular opening
(Nematollahi <i>et al.</i> , 2018)	-	-	30x15	30	1mm/min	20-35	Fly ash, slag, solid activator, sand fine (avg 172microm) and coarse (avg 898microm)	custom-made 3D printer with 45 degree nozzle with rectangular opening

Tableau 3 : Caractéristiques des matériaux utilisés en impression 3D.[48]

Partie II

Programme de recherches
expérimentales

Introduction :

En raison de la propagation de la pandémie de coronavirus (covid-19), qui a conduit à la fermeture de l'université et des laboratoires, nous n'avons pas pris le côté pratique du mémoire, concernant le choix des matériaux, composition, formulation, réalisation des mortiers imprimables, les essais à l'état frais et durci sur ces mortiers et puis analysé les résultats.

Alors, nous allons donc prendre deux études qu'ils ont faites auparavant sur les mortiers imprimé en 3D, de le choix des matériaux jusqu'à les résultats obtenus, ou nous expliquons les processus qu'ils ont effectués et les résultats des expériences qu'ils ont obtenues.

Les deux études sont :

A- Formulation et caractérisation chimique et rhéologique des mortiers imprimables en 3D à base de mélanges de ciments portland et sulfoalumineux [48].

B- Composition des bétons imprimés en 3D - Substitution de composants issus des matières premières par des fines de briques [49].

II.A.1. Objectif :

- Développer une méthodologie de formulation de ces mortiers pour adapter les formulations aux exigences d'impression et/ou au type de matériau utilisé

-Formuler des mortiers cimentaires imprimables à partir d'une imprimante 3D.

II.A.2. Choix et caractérisation des matériaux :

II.A.2.1. Ciments OPC/CSA :

Deux ciments ont été utilisés : un ciment portland EXTREMAT® CEM I 52,5 N-SR3 CE PM-CP2 NF I contenant 99% de Clinker (noté CEM I dans toute la suite) et un ciment sulfoalumineux bélitique Alpenat (noté CSA dans toute la suite), tous deux issus de la société Vicat.

Les caractéristiques chimiques et minéralogiques du CEM I et du CSA fournies par le fabricant, présenter dans les tableaux II.1 et II.2. Les fiches techniques des deux ciments seront fournies en annexes A et B.

Composition	Na ₂ O eq.	Perte au feu 950°C	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Cl ⁻	S ²⁻	Résidu insoluble
CEM I	0.46	1.20	0.91	20.96	3.65	5.05	64.51	2.24	0.06	0.2	0.45
CSA	0.16	3.8	-	8.16	18.22	7.64	43.60	15.24	0.05	-	-

Tableau 4 : Compositions chimiques du CEM I et du CSA

Composition	C ₃ S	C ₄ A ₃ \$	C ₂ S	C ₃ MS ₂	C ₃ A	C ₃ FT	C ₄ AF	C\$	Chaux libre	Surface Blaine (cm ² /g)	Densité	Temps de début de prise (min)
CEM I	62.6	-	16.5	-	1.5		13.1	4	0,92	3940	3.19	168
CSA	-	54.3	29.1	4.5	-	9.3	-	0.4	0.2	4500	2.97	42

Tableau 5 : Compositions minéralogiques et principales caractéristiques du CEM I et du CSA

II.A.2.2. Sable :

Un sable calcaire concassé 0/2mm avec 19% de fines (particules inférieures à 63µm) fournit par les Carrières du Boulonnais a été utilisé. Le sable a une masse volumique de 2670 kg/m³ et une absorption d'eau WA24 de 0,52%. La Figure II-1 présente la courbe granulométrique du sable.

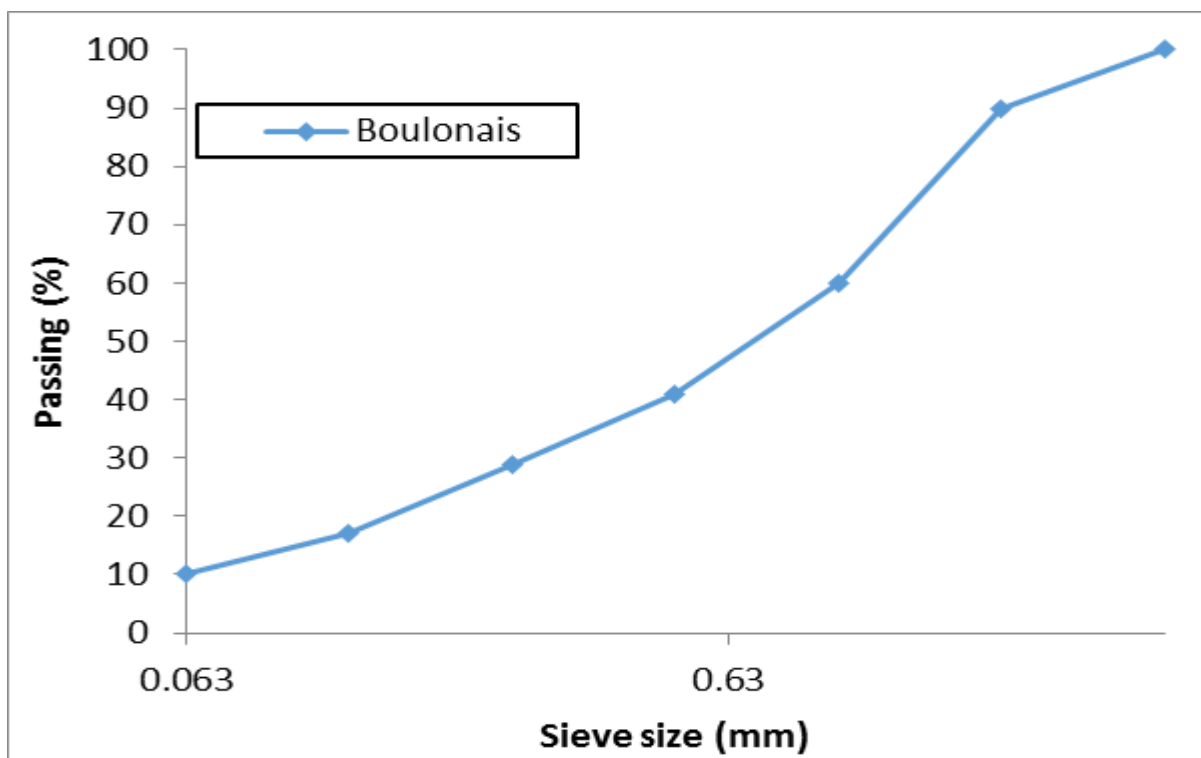


Figure 25 : Courbe granulométrique du sable.

II.A.2.3. Superplastifiant :

Un superplastifiant de nouvelle génération (copolymère acrylique non chloré polyvalent (SP)/haut réducteur d'eau, SIKA VISCOCRETE TEMPO 11) a été utilisé. L'annexe C détaille les propriétés du SP.

II.A.3. Méthode de formulation et de composition :

Comme nous l'avons évoqué dans la partie bibliographique, aucune norme ne couvre à l'heure actuelle la formulation ou la caractérisation des matériaux cimentaires imprimables. La définition d'un cahier des charges nécessite pourtant d'une part de disposer d'essais permettant de caractériser les différentes propriétés visées du matériau et d'autre part de fixer des performances à atteindre pour chacune de ces propriétés. La composition du matériau peut ensuite être fixée par itérations successives, en modifiant progressivement les différents paramètres de formulation des mortiers jusqu'à atteindre les performances visées.

II.A.3.1. Dispositif manuel d'impression 3D au laboratoire :

A l'échelle du laboratoire, l'impression 3D a été simulée manuellement, en utilisant un « pistolet à colle ». La Figure II-2 présente l'outil utilisé. Ce dernier est constitué d'un tube cylindrique de 5cm de diamètre, dans lequel peut coulisser un piston qui applique une pression (contrôlée manuellement) sur le matériau fluide se trouvant dans le tube. Ce dernier est ainsi extrudé à travers un ajutage en plastique. Des ajutages de différentes géométries ont pu être réalisés par impression 3D plastique. Sauf mention contraire, un ajutage tronc conique d'ouverture à la base de 5cm de diamètre et de 1cm de diamètre en sortie a été utilisé. Ce pistolet est considéré comme un test de simulation manuelle de l'impression 3D à l'échelle du laboratoire avant de passer à une impression à grande échelle. Il sert tout d'abord à vérifier l'extrudabilité du mortier en choisissant D_{max} des matériaux utilisés convenable au diamètre de la buse.



Figure 26 : Pistolet utilisé pour l'impression 3D manuelle.

II.A.3.2.cahier des charges :

Dans ce travail nous avons tout d'abord cherché à développer des essais simples permettant de simuler, à l'échelle du laboratoire, le procédé d'impression 3D pour fixer un cahier de charges. La simplicité du dispositif utilisé est nécessaire d'une part afin d'assurer la répétabilité des essais de caractérisation et d'autre part pour limiter le plus possible la quantité de matériaux utilisés et la lourdeur des essais.

Le cahier des charges est ainsi défini de la manière suivante : le mortier doit être extrudable, il doit être également constructible et permettre l'empilement de plusieurs couches successives tout en ayant une résistance à la compression à 28 jours des mortiers imprimés comparable à celle des mortiers traditionnels.

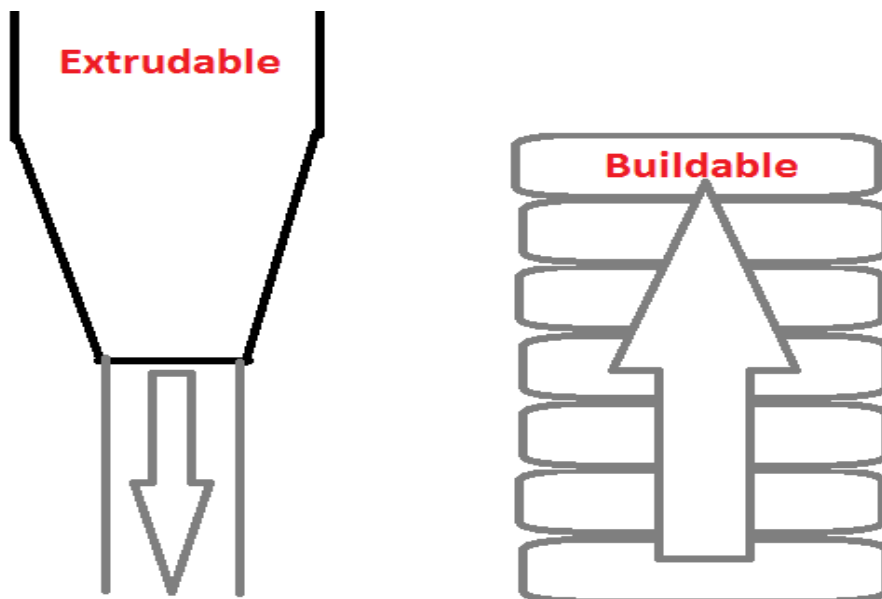


Figure 27 : Schématisation du cahier des charges.

II.A.3.3.Réalisation des Mortiers:

La procédure de mélange standard de la norme EN 196-1 a été modifiée pour aboutir au mortier requis pour l'impression 3D. Un malaxeur permettant les mélanges de compositions. Les étapes sont les suivantes :

étapes	Actions	Vitesse de malaxage	Temps de malaxage(s)	Temps totale
1	le ciment est placé dans le récipient du mélangeur	1	30	30
2	l'eau contenant le SP est ajoutée au ciment	1	30	1
3	le sable est ajouté lentement	1	30	1.30

4		2	30	2
5	le mortier est raclé dans le récipient du mélangeur	Arrêter	30	2.30
6		2	2.30	5

Tableau 6 : Etapes suivie pendant la réalisation des mortiers.



Figure 28 : Malaxeur a mortier

II.A.3.4.Mesure de l'extrudabilité:

Le mortier est tout d'abord malaxé selon le protocole décrit précédemment. Il est ensuite placé dans le pistolet à l'aide d'une spatule puis est légèrement compacté en frappant manuellement la paroi du pistolet pour s'assurer qu'il n'y a pas de zones vides. Ensuite, le pistolet est fermé et une pression manuelle lente et monotone est exercée sur le piston pour extruder le mortier en un cordon le plus régulier possible.

Pour que le mortier soit considéré comme extrudable trois critères doivent être remplis.

- le mortier ne doit pas s'écouler seul du pistolet, l'application d'une légère pression doit au contraire être nécessaire.
- la quasi-totalité du mortier contenu dans le pistolet doit pouvoir être extrudée sans blocage ni filtration.

Le matériel utilisé permet de mettre en évidence très simplement les risques de blocages. Lorsque la pression nécessaire pour faire sortir le mortier devient trop élevée, l'extrusion s'arrête et le mortier est alors considéré comme non extrudable (Figure 29).



Figure 29 : Blocage de la buse à cause du durcissement ou la filtration du mortier.

La filtration se traduit quant à elle par la sortie d'un coulis fluide dépourvu de particules grossières, un blocage suit généralement très vite les cas de filtration car les particules de sable s'accumulent dans l'extrémité de la buse.

Plusieurs paramètres de formulation ont été modifiés pour favoriser l'extrudabilité comme le rapport entre le D_{max} du sable et l'ouverture de la buse, le volume de la pâte de ciment et la fluidité du mortier.

Plusieurs tentatives ont été nécessaires pour remplir les spécifications fixées pour le mortier extrudable. Au cours de ces essais, certains cas de défaillance se sont produits pendant l'extrusion en bloquant la buse en raison du durcissement rapide ou de la filtration (Figure 29). D'autres étaient dues à l'excès de la fluidité des matériaux qui sortaient de la buse sans exercer une pression sur le pistolet (Figure 30).

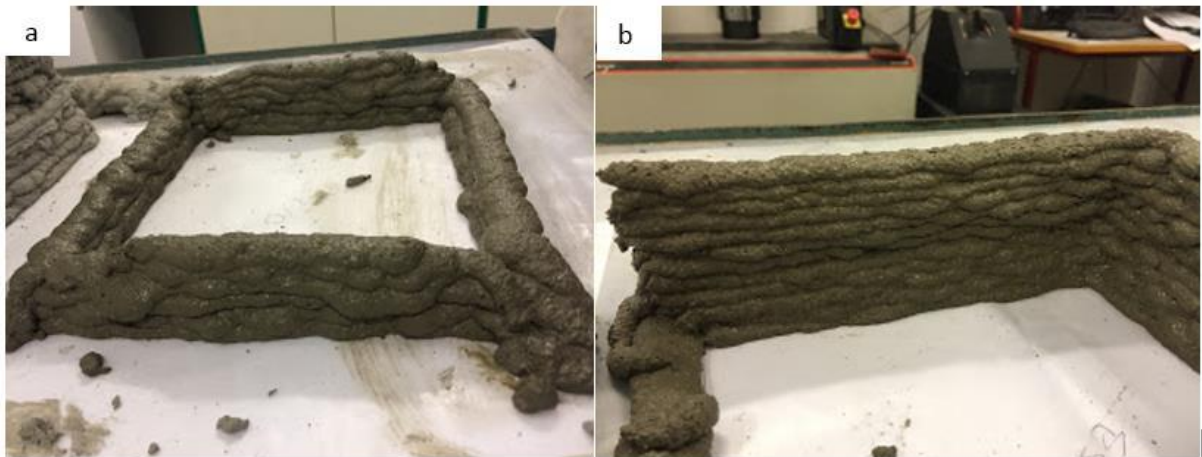


Figure 30 : Exemple d'un matériau trop fluide.

II.A.3.5.Mesure de la constructibilité:

La constructibilité est ensuite testée en imprimant manuellement le matériau en couches successives. Comme discuté dans la bibliographie, le matériau développé et la forme imprimée sont reliés. Au cours de l'impression, deux modes de défaillances peuvent être définis.

Le premier type de défaillance est dû à un manque de seuil de cisaillement du matériau et correspond à une rupture due à l'affaissement des couches inférieures qui ne sont pas capables de supporter le poids des couches superposées (Figure 31.a). Par contre La Figure 31.b montre un mortier constructible qui ne présente pas d'affaissement au niveau des couches inférieures.



**Figure 31 : a) mortier trop fluide et considéré comme non constructible.
b) mortier constructible permettant la superposition d'une dizaine de couches**

Le second type de défaillance est présenté dans la Figure II.8 et correspond plutôt à une instabilité mécanique (flambement de la structure en matériau frais). Le matériau développé montre un matériau constructible (premières couches non étalées). Par contre, la structure n'est pas stable pour ce matériau (mur droit) et au bout d'une certaine hauteur l'ensemble de la forme s'effondre sur le côté.



Figure 32 : Effondrement d'un mortier constructible (environ 8 couches) en raison d'une instabilité de structure.

II.A.3.6. Détermination de la composition:

Deux mortiers ont été formulés avec deux types de liants, à base de CEM I seul ou à base de mélange CEM I et CSA. De plus, après avoir utilisé plusieurs types de sables, il s'est avéré que le Dmax du sable était un paramètre du premier ordre pour le contrôle de l'extrudabilité. Un sable de Dmax=2mm a finalement été choisi (sable concassé 0/2mm à 19% de fines fourni par les Carrières du Boulonnais).

Les différents paramètres de formulation des mortiers (rapport CSA/OPC, rapport sable/Ciment, rapport E/C, dosage en superplastifiant) ont ensuite été modifiés afin d'obtenir des propriétés à l'état frais satisfaisant au cahier des charges fixé (extrudabilité et constructibilité).

Les compositions de ces matériaux sont présentées dans le Tableau II.4. Ces mélanges sont considérés pour le reste de l'étude comme des mortiers à prise lente (M100/0) ou à prise rapide (M93/7). Les mélanges sont désignés en fonction du pourcentage de CEM I et de CSA utilisé : le premier nombre fait référence au pourcentage de CEM I et le second au pourcentage de CSA. Ainsi, M93/7 fait référence à un mélange composé de 93% d'OPC et de 7% de CSA. L'étiquette M désigne les Mortiers.

Composition	Sable(g)	OPC(g)	CSA(g)	Eau(g)	Sp(g)	E/C	Sp/C
M100/0	850	682.75	0	236.25	1.76	0.35	1.76
M93/7	800	627.75	47.25	236.25	1.76	0.346	1.76

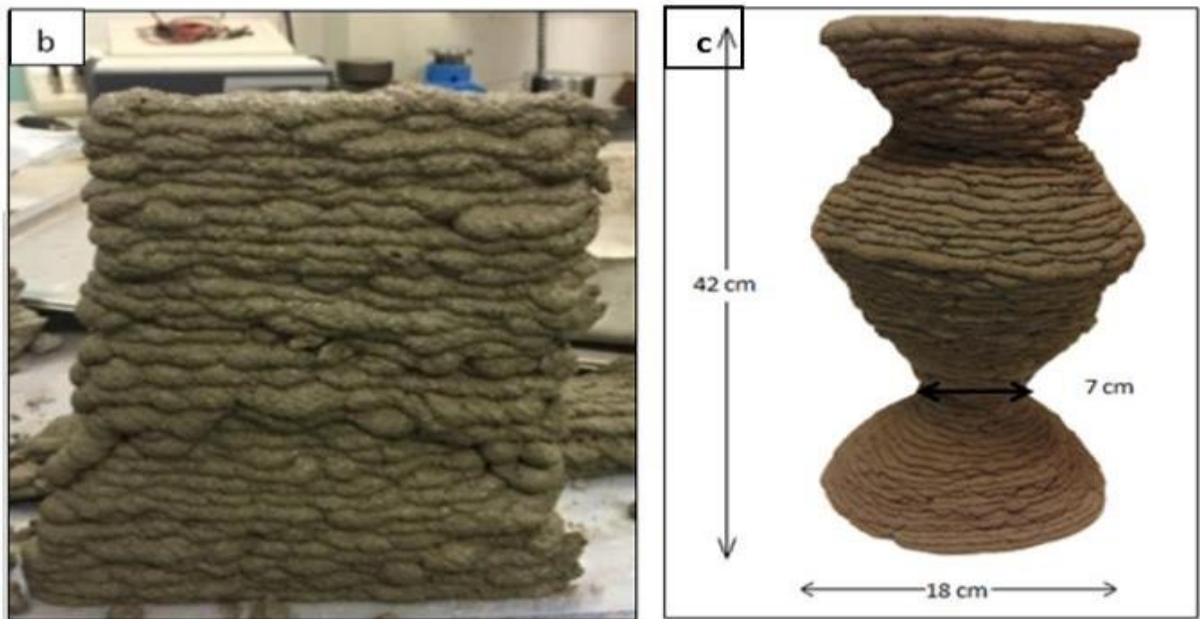
Tableau 7 : Compositions des mélanges de M100/0 et M93/7

II.A.4. Essais a l'état frais :

II.A.4.1. Caractérisation a l'état frais au pistolet:

Les deux mortiers (Tableau 7) ont permis de formuler des mortiers extrudables. D'un point de vue rhéologique, le comportement des mortiers M100/0 et M93/7 était très similaire en ce qui concerne l'extrusion et le dépôt des premières couches. Cependant, l'ajout de CSA dans le mélange permet un raidissement plus rapide du matériau et offre une meilleure aptitude à la construction pour M93/7 que pour M100/0. En fait, le pourcentage de 7% a permis de conserver l'ouvrabilité du mortier pendant le malaxage et un raidissement rapide pour les couches superposées.

Pour illustrer la bonne constructibilité du mortier M93/7, des parois de 21 cm de longueur ont été imprimées avec 30 couches de 0,5 cm de hauteur chacune (Figure 33.b). Ensuite, des formes avec des bases circulaires avec un diamètre variable ont été imprimées comme le montre la Figure 33.c. Ces structures ont été faites à partir de plusieurs mélanges (environ 750 ml chacun) directement après le mélange du mortier (5 minutes) avec une période d'impression de 15 minutes chacune et séparée par 5 minutes de mélange du matériau.



**Figure 33 : b) construction « manuelle » d'une pièce de plus de trente couches avec M93/7.
c) des formes avec des bases circulaires avec M93/7.**

Deux mortiers imprimables ont été fabriqués à partir des matériaux indiqués dans le Tableau 7. La différence entre ces deux mélanges est liée à leur application : un mélange est utilisé pour les structures larges (M100/0) et le deuxième (M93/7) pour des structures plus élancées. Les deux mélanges partagent le même volume d'eau, de SP et de ciment. La quantité de sable a été modifiée pour améliorer l'extrudabilité du M93/7.

Ainsi, en changeant les paramètres de la formulation (sable ou ciment), le pistolet est une méthode simple et rapide qui permet de converger vers un mortier imprimable.

II.A.4.2. Affaissement au cône MBE:

Traditionnellement, le comportement rhéologique à l'état frais est étudié par des essais comme le cône MBE. Nous avons donc tout d'abord essayé d'utiliser ce dispositif pour caractériser le comportement à l'état frais des mortiers imprimables.

L'essai d'affaissement a été effectué à l'aide d'un mini cône MBE (Mortiers de Béton Équivalent), c'est une moule métallique, tronconique ($d=50\text{mm}$, $D=100\text{mm}$ et $H=150\text{mm}$).

(Figure 34).

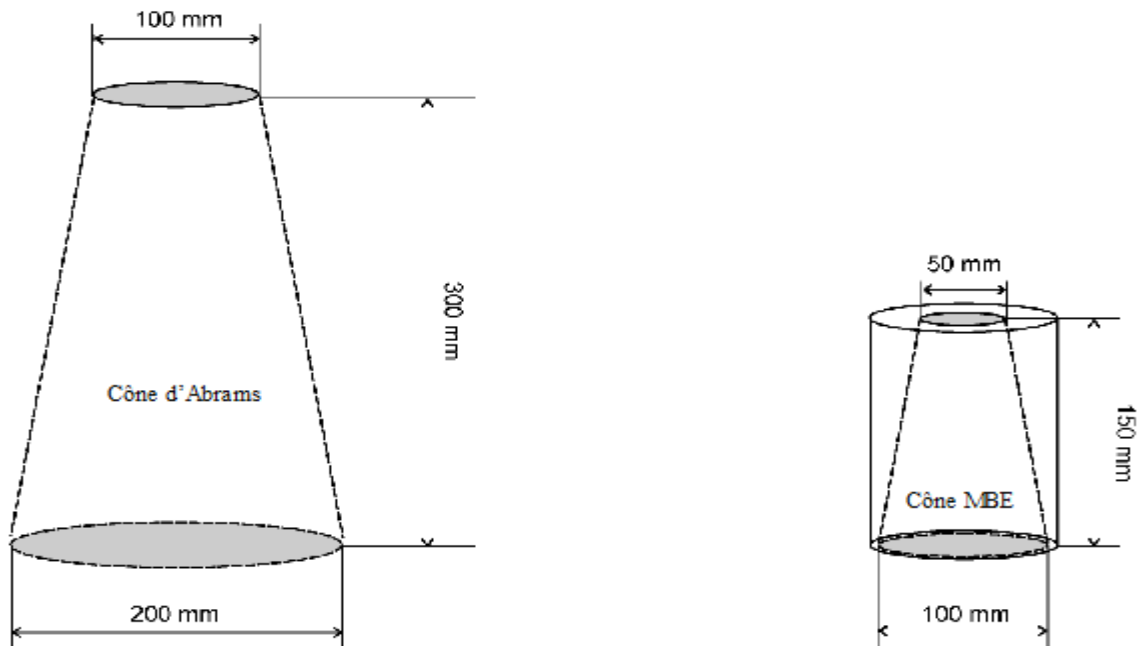


Figure 34 Dimension du cône MBE par rapport au cône d'Abrams.

Mode opératoire :

Le mode de remplissage du cône a toutefois été modifié en raison de la fermeté des mortiers.

Le cône MBE est placé au milieu d'une table à choc puis rempli jusqu'à moitié puis soumis à 5 chocs. Le moule est ensuite complété et soumis à 5 nouveaux chocs avant de lisser la surface du cône. L'affaissement « a » est ensuite mesuré comme indiqué dans la Figure 35.

L'affaissement est mesuré à 20, 30, 45 et 60 minutes.

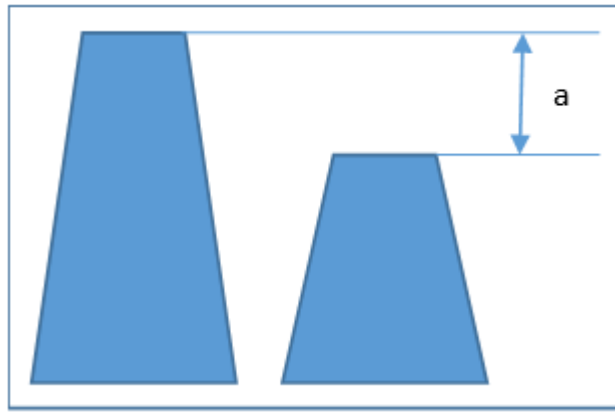


Figure 35 : Schématisation du cône MBE et de l'affaissement.

II.A.4.3. Cisaillement estimé à partir du plongeur de Vicat au repos :

Le cône MBE ne pouvant pas être utilisé dans cette étude, le seuil de cisaillement du matériau a été évalué sur la base d'un test de pénétration. La profondeur de pénétration h du plongeur de Vicat pour le test de consistance standard (plongeur de diamètre $\varnothing=10\text{mm}$ défini par ISO 9597) dans les mortiers est mesurée (Figure 36).

D'après [50] le seuil de cisaillement des échantillons de béton frais est affecté par leur état (mêlé ou au repos).

Lootens [51] ont montré que le seuil de cisaillement peut être dérivé de la mesure de pénétration avec un plongeur cylindrique de rayon R selon l'Equation II.1.

$$\tau_0 = 3/(2\pi Rh) \quad \text{Equation II.1}$$

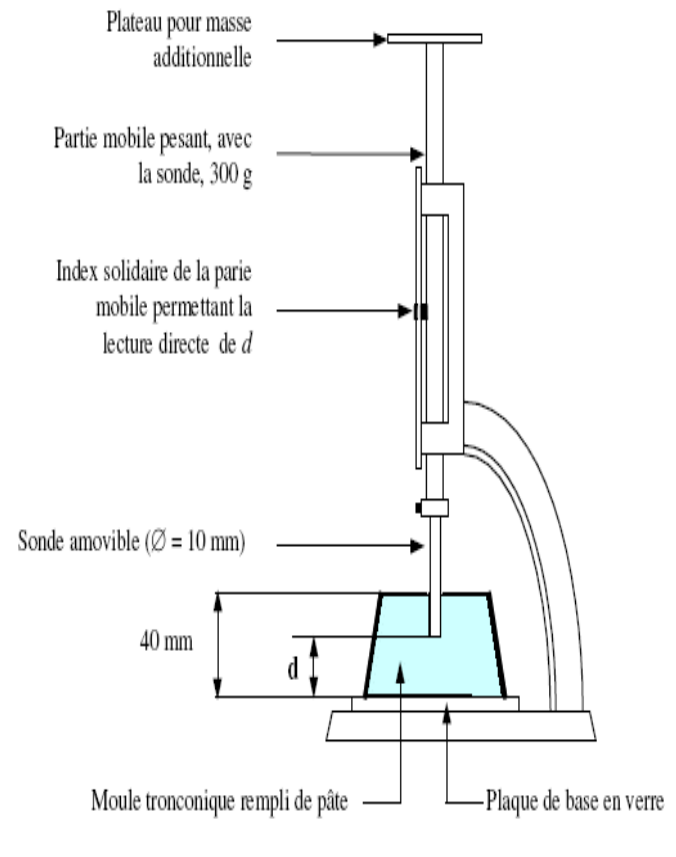


Figure 36 : Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance.

Mode opératoire :

- 6 moules déjà placés sur une table à chocs ont été remplis après 5 minutes de mélange du mortier et ensuite soumis à 3 chocs afin d'assurer un remplissage correct des moules.
- afin de simuler la contrainte de cisaillement du matériau après impression (au repos), les échantillons sont conservés sans agitation.
- Après cela, les échantillons sont maintenus au repos jusqu'à ce que la mesure soit faite afin de calculer l'évolution du seuil de cisaillement.
- Les mortiers sont testés à 10 min, 15 min, 20 min, 25 min, 30 min et 45 min au repos.

II.A.4.4. Enfoncement au Fall cône avec malaxage :

Dans le cas des mortiers remalaxés, le test de Vicat utilisé dans la partie précédente n'était pas efficace. En effet, le faible diamètre du plongeur ne permettait pas d'avoir une valeur de l'enfoncement mesurable, ce dernier atteignant systématiquement le fond du moule à chaque mesure.

Un autre test simple était nécessaire pour évaluer le comportement à l'état frais pour les mortiers mélangés. Le test du Fall cône PR NF EN ISO 17892-6 .

Ce test Fall cône a permis un suivi de l'évolution de la pénétration du cône lors du changement des caractéristiques rhéologiques de la pâte de ciment avec malaxage.

Ainsi, ce test simple a permis de définir une gamme de pénétration où un mortier peut être considéré comme imprimable.

Mode opératoire :

-Après malaxage, L'échantillon est placé dans un gobelet en métal de 55 mm de diamètre et de 40 mm de profondeur.

-rempli à refus.

-tapé 10 fois avant d'araser la surface et 10 fois de plus pour avoir une surface plane et éliminer les vides.

- Un cône de rayon de 1cm et de hauteur de 3.5cm et de masse 80g est libéré au centre de la coupe et la pénétration est enregistrée.

- Les valeurs de la pénétration sont mesurées chaque 5 minutes jusqu'à avoir un enfoncement nul.

- Le mortier est mélangé dans le malaxeur pour 3 minutes avant de mesurer l'enfoncement.

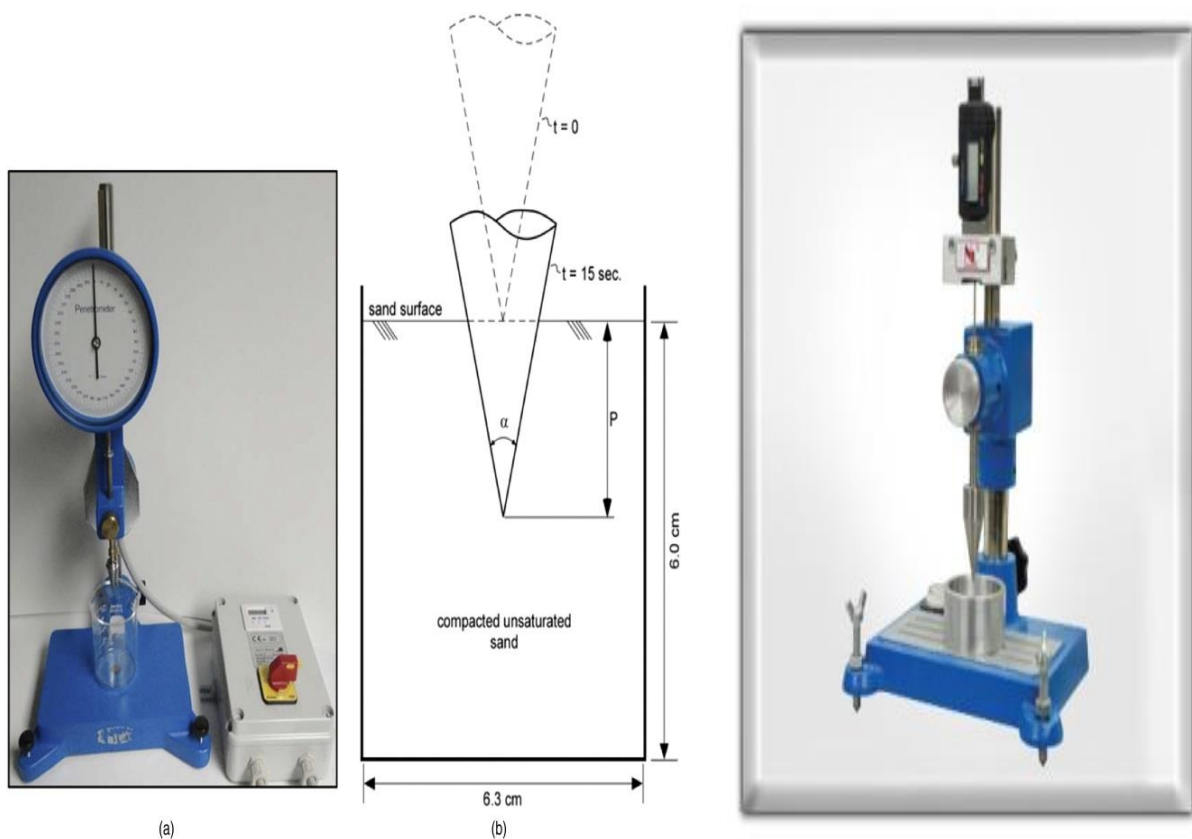


Figure 37 : Appareil Fall cône (à cône de chute).

II.A.4.5. Mesure du temps de prise des mortiers CSA/OPC :

But de l'essai :

La mesure du temps de prise des mortiers destinés à être imprimés en 3D est primordiale dans la mesure où cela donnera un indicateur de la durée pendant laquelle le matériau pourra rester maniable et imprimable.

Mode opératoire :

Le temps de prise a été mesuré sur un appareil de Vicat automatique [NF EN 196-3].

Étapes	Action
1	Nettoyer et huiler le moule cylindrique ainsi que le disque de support.
2	Les mortiers sont placés dans le moule dans l'appareil de Vicat automatique équipé de l'aiguille de $\varnothing = 1,13$ mm .
3	L'appareil a été placé à une température contrôlée de 20°C .
4	le moule a été placé dans un récipient rempli d'eau de sorte que la surface de la pâte soit immergée d'au moins 5 mm pour garder l'humidité.
Paramètres de mesure	
Type de chute	Libre
Type d'intervalle de temps entre les mesures	Fixe
Intervalle de temps entre les mesures	5 minutes

Tableau 8 : Étapes suivies durant l'essai de prise et paramètres de mesure utilisés.



Figure 38 : Appareil vicat automatique a enregistreur.

Ce test automatisé reprend le principe du test de Vicat où l'on mesure l'enfoncement d'une aiguille dans un matériau cimentaire en fonction du temps. Le diamètre de l'aiguille est égal à 1mm. Le mortier frais est quant à lui placé dans un moule cylindrique d'une hauteur de 40mm pour un diamètre intérieur de 60mm.

Les mesures sont prises automatiquement par l'appareil toutes les 5 minutes sur le même échantillon et séparées de 10 mm de la bordure du moule et les unes des autres.

II.A.5. Essais a l'état durci :

II.A.5.1. Mesure de la résistance à la compression :

But de l'essai :

A travers les essais mécaniques réalisés, plusieurs problématiques seront intéressantes à analyser, comme L'influence du mode de mise en œuvre sur les performances mécaniques est alors évaluée en comparant des spécimens imprimés à des spécimens non-imprimés et mis en œuvre de manière normalisée.

Mode Opérateur :

Afin de tester la résistance à la compression des matériaux imprimés, il faut pouvoir réaliser des éprouvettes en couches successives. Là encore le pistolet est utilisé pour réaliser des couches superposées.

Deux méthodes de mise en œuvre ont donc été suivies. Les mortiers ont d'abord été placés selon la norme EN NF-196-1 à la table à chocs. Une fois le mortier réalisé, celui-ci a été disposé dans des moules normalisés, Des moules normalisé permettant de réaliser 3 éprouvettes de section carrée 4cm×4cm et de longueur 16cm (40×40×160mm) (Figure 39).



Figure 39 : Moules pour éprouvettes de mortier (40x40x160) mm

Un appareil de chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de 15 mm à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60s (Figure 40).



Figure 40 : Table à choc.

Ce type de mise en œuvre permet de tester les propriétés mécaniques du matériau dans des conditions normalisées, sans prendre en compte l'effet du mode de mise en œuvre.

Une seconde méthode de remplissage a également été utilisée pour fabriquer des éprouvettes imprimées.

Dans ce cas, le mortier a été directement imprimé dans les moules 4x4x16 cm en utilisant le pistolet avec une buse rectangulaire spéciale de 3x1 cm² afin d'avoir la simulation la plus proche possible du processus d'impression.

Le processus d'impression de ces échantillons consiste à déposer 3 couches les unes au-dessus des autres sans compactage (Figure 41).

Les spécimens sont imprimés dans des moules 4x4x16 cm afin d'avoir des surfaces lisses latérales permettant une application facile de la charge lors des essais de compression.

L'objectif du deuxième mode de remplissage est de mettre en évidence l'influence de la superposition des couches sur les résistances des spécimens testés.



Figure 41 : Développement de spécimens 4x4x16cm imprimés pour les essais mécaniques.

Conservation des éprouvettes :

Après le moulage des échantillons imprimés et non-imprimés, tous les échantillons sont placés dans une pièce stabilisée à 20°C dans un sac en plastique avec une petite quantité d'eau déminéralisée afin de maintenir une humidité relative de 100%.

Les spécimens imprimés ont été directement imprimés dans la pièce et placés une heure plus tard dans les sacs afin d'éviter tout effet de vibration sur les éprouvettes.

Après deux jours, les échantillons sont démoulés et replacés dans les mêmes conditions jusqu'aux essais.

II.A.6. Analyse des Résultats :

II.A.6.1.Résultats à l'état frais:

II.A.6.1.1 mesure de l'affaissement au cône MBE:

Comme indiqué précédemment, cet essai permet de caractériser le comportement rhéologique du mortier frais. L'affaissement est mesuré à 20, 30, 45 et 60 minutes sur le mortier M93/7.présenté dans la figure 42.



Figure 42 : Cône MBE test réalisé sur le mortier 93/7 en laissant le mortier au repos à 20, 30, 45 et 60 minutes respectivement.

la Figure II.18 montre que le remplissage du cône au cours du temps n'était pas complet alors, L'affaissement n'est pas mesurable.

Ainsi, comme les matériaux imprimables en 3D sont généralement très fermes, donc le cône MBE ne semble pas être adapté à leur caractérisation.

II.A.6.1.2 Cisaillement estimé à partir du plongeur de Vicat au repos:

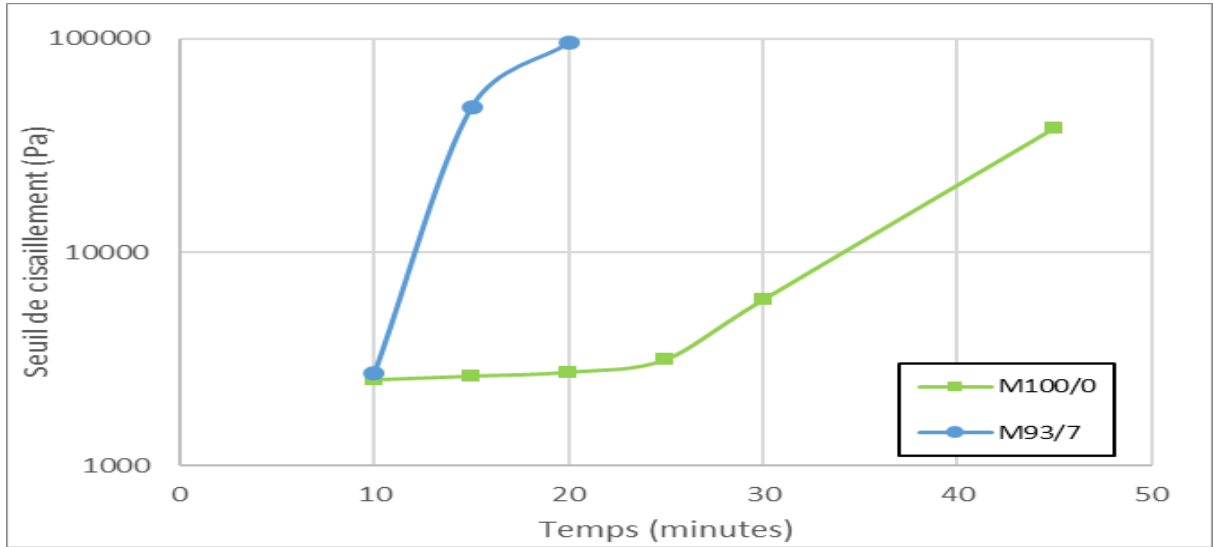


Figure 43 : Seuil de cisaillement de M100/0 et M93/7.

La Figure 43. Présente l'évolution des seuils de cisaillement des mortiers M100/0 et M93/7.

- L'évolution du seuil de cisaillement de M93/7 est présentée, A 10 minutes, le seuil de M93/7 est égal à celui de M100/0 puis il augmente très rapidement et aucun enfoncement n'est plus mesurable après 20 minutes.
- Jusqu'à 25 minutes, le seuil de cisaillement de M100/0 augmente lentement.
- au-delà de 25 minutes, l'augmentation est beaucoup plus rapide. Ce résultat semble conforme à l'étude bibliographique qui indique qu'un comportement non-thixotrope commence à partir d'environ 30 minutes [30].

II.A.6.1.3 Enfoncement au Fall cône avec malaxage :

Temps (min)		6	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Enfoncement (mm)	M100/0	29.3	25.2	23.4	21	21.6	20	16.4	15	15.2	11.8	11.4	11.1
	M93/7	24	18.6	14.5	14.5	11.9	6.9	5.6	2.7				

Tableau 9 : Résultats de pénétration du test de Fall cône.

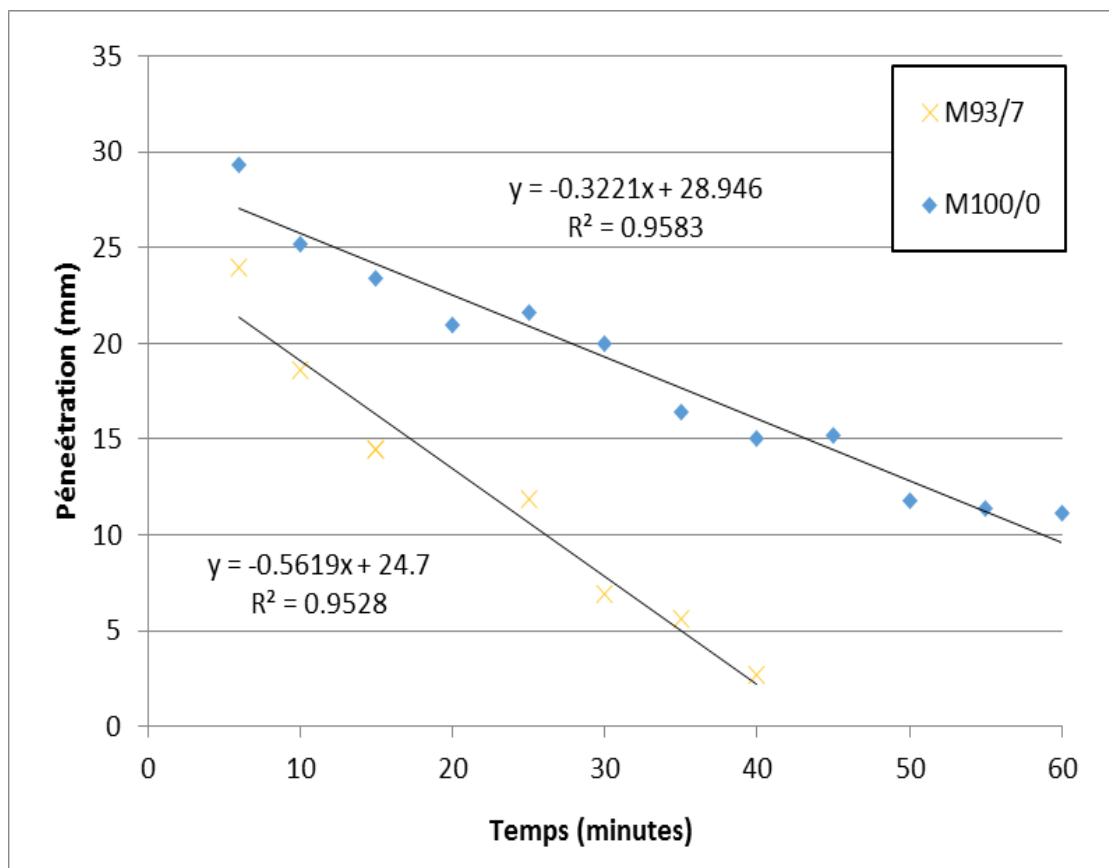


Figure 44 : Résultats du Fall cône M100/0 et M93/7.

Le test au pistolet a été effectué en parallèle à cet essai afin de vérifier l'imprimabilité du matériau au cours du temps.

-Les valeurs en rouge dans le Tableau II.6 montrent les intervalles dans lesquels les matériaux sont imprimables.

-La valeur la plus élevée correspond à la limite de constructibilité (25,2 mm et 24 mm pour M100/0, M93/7 respectivement).

-La valeur moins élevée à la limite d'extrudabilité (11,8 mm et 11,9 mm pour M100/0 et M93/7 respectivement).

-Ces valeurs limites sont très proches pour les 2 mortiers.

-Par conséquent, pour une pénétration du cône entre 12mm et 24mm, le mortier peut être considéré comme imprimable.

En outre, les courbes de pénétration au cours du temps des deux mélanges M93/7 et M100/0 sont présentées Figure 44. La variation de la pénétration du Fall cône suit une pente plus forte pour le M93/7 que celle du M100/0. Cela met en évidence l'effet du CSA sur le durcissement plus rapide pour M93/7 par rapport à M100/0.

II.A.6.1.4 Mesure du temps de prise des mortiers CSA/OPC :

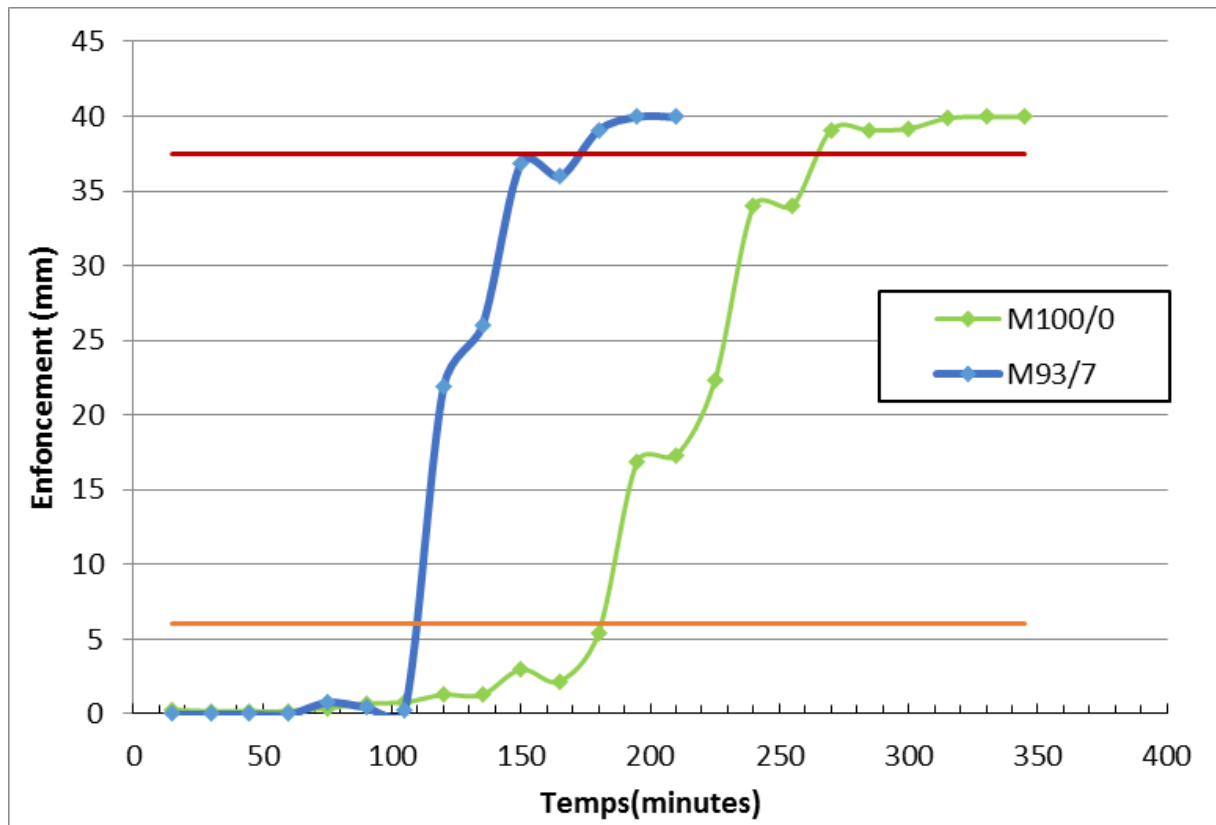


Figure 45 : Début et fin de prise avec l'aiguille de Vicat pour M100/0 et M93/7

Les résultats des essais de pénétration de M100/0 et M93/7 au cours du temps sont présentés à la Figure 45.

-Leurs intersections avec les deux droites à 6 mm et 37.5 mm représentent respectivement les temps initial et final de prise.

- Pour M93/7, le temps de début de prise est enregistré à 110 minutes et le temps de fin de prise à 150 minutes.

- pour M100/0, le temps de début de prise est de 180 minutes tandis que le temps de fin de prise est de 265 minutes.

-Par conséquent, les temps de prise sont plus petits lorsque le CSA est utilisé. De plus, la durée entre le début et la fin de prise est raccourcie à plus de la moitié entre les 2 mélanges (40 minutes et 85 minutes pour M93/7 et M100/0 respectivement).

-l'effet du CSA est clair sur l'accélération du raidissement des mortiers et l'augmentation de la constructibilité.

II.A.6.2.Résultats à l'état durci :

II.A.6.2.1. Mesure de la résistance en compression :

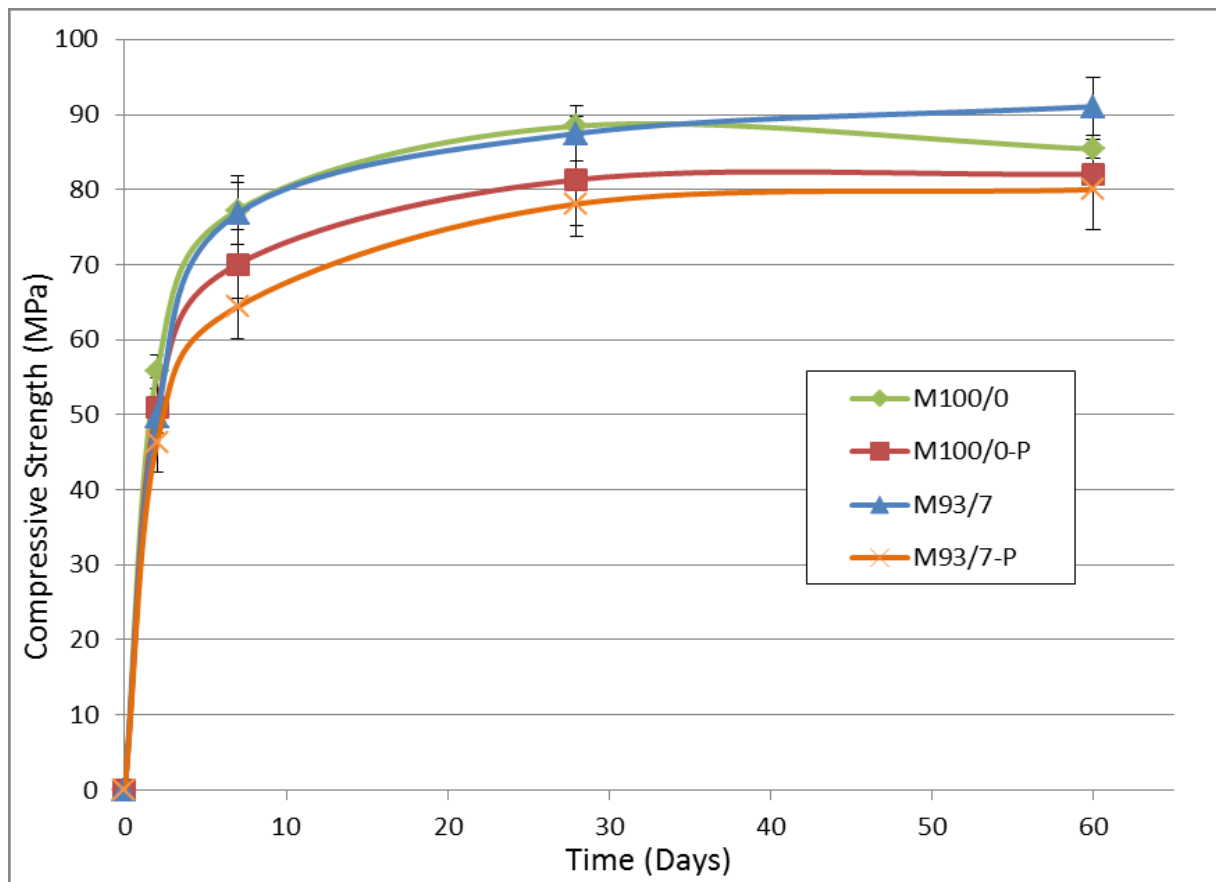


Figure 46 : Résistance à la compression de M100/0, M100/0-P, M93/7 et M93/7-P

Les essais mécaniques ont été réalisés pour les mortiers M100/0, M93/7, M100/0-P et M93/7-P à 2, 7, 28 et 60 jours selon les normes EN NF-196-1. Chaque valeur est donc calculée comme la moyenne de 6 spécimens.

La Figure 46 présente la résistance à la compression des mortiers M100/0, M100/0-P, M93/7 et M93/7-P après 2, 7, 28 et 60 jours d'hydratation.

-M100/0 et M93/7 représentent les mortiers moulés suivant les normes NF EN196-1.

-M100/0-P et M93/7-P sont préparés avec les mêmes mélanges mais imprimés dans des moules en couches superposées.

-A deux jours, la résistance à la compression des mortiers M100/0 et M93/7 est quasi identique. Ce résultat montre que, malgré la modification des réactions d'hydratation due à l'incorporation de 7% de CSA dans le mortier M93/7, la résistance à la compression précoce n'a pas été affectée.

- Les évolutions des résistances moyennes à la compression de M93/7 et M100/0 sont ensuite quasi identiques. Nous pouvons conclure de ce résultat que l'ajout de 7% de CSA a permis de fournir un matériau constructible (le raidissement du matériau) sans affecter la résistance à la compression à long terme.

- La comparaison des résistances à la compression des éprouvettes non imprimées et imprimées montre que la résistance des éprouvettes imprimées est systématiquement inférieure à celle des éprouvettes non imprimées.

- Cette diminution de la résistance pour les échantillons imprimés provient sans aucun doute de la porosité supplémentaire liée au procédé puisque les échantillons non-imprimés sont compactés (table à chocs) lors de la mise en place contrairement aux échantillons imprimés qui sont simplement déposés en couches successives.

- Des vides additionnels dus au dépôt en couches sont effectivement visibles sur les échantillons des spécimens imprimés dans la Figure 41.

II.A.7.conclusion:

Pour ce travail qui s'intéresse à la formulation et à la caractérisation de mortiers cimentaires imprimables en 3D. Avec un objectif de formuler des mortiers imprimables à l'échelle laboratoire et réelle à partir de l'établissement d'une méthodologie de formulation adaptée au cahier des charges de l'impression 3D.

- Un cahier des charges qu'il permet de définir un mortier imprimable comme un matériau extrudable (qui sort de la buse sans blocage ni filtration) et constructible (qui ne se déforme pas sous le poids des couches supérieures). Aussi, les résistances mécaniques du matériau imprimé doivent être compatibles avec les exigences de la construction.
- A l'échelle du laboratoire, la méthodologie permet de choisir les matériaux, l'extrudabilité et la constructibilité sont vérifiées au moyen d'un dispositif simplifié (pistolet) permettant de simuler manuellement l'impression, qu'il permet de fixer le D_{max} du sable, la taille de l'ouverture de la buse, le volume de la pâte de ciment et la fluidité du mortier. Cette première phase permet la formulation de deux mortiers avec des cinétiques de prise différentes. Les ciments utilisés sont à la base de ce changement.
- Un premier mortier est formulé avec un ciment Portland pur (M100/0) et un second est formulé à base de ciment Portland et Sulfoalumineux (M93/7) présentant une prise plus rapide que le premier.
- A l'état frais, l'enfoncement du plongeur de Vicat (sur mortier au repos) et du Fall cône (sur mortier mélangé) montrent une accélération du durcissement du matériau contenant du CSA au repos/mélangé par rapport au matériau non-accélééré.
- Le CSA accélère le raidissement du mortier et permet en plus une réduction de moitié du temps de prise de M93/7 par rapport à M100/0.
- L'accélération du raidissement et du temps de prise en ajoutant du CSA au mélange à base de CEM I (effet du matériau) n'a pas provoqué de diminution des résistances mécaniques des mortiers.
- Des résistances plus faibles sont toutefois systématiquement obtenues, avec chaque mortier, pour les

échantillons imprimés par rapport à ceux non imprimés. Ce résultat met en évidence une réduction de la résistance en compression liée au procédé d'impression lui-même. Les résistances obtenues sur les mortiers imprimés restent toutefois élevés.

II.A.8.perspectives:

Le matériau développé présente un impact environnemental important, en raison de la teneur élevée en ciment portland des mortiers.

- Des formulations moins chargées en Portland pourraient être réalisées en ajoutant des additions minérales.

L'utilisation du CSA comme accélérateur à court terme sans chute de résistances mécaniques. Son utilisation pratique est délicate puisque le mortier accéléré est susceptible de durcir dans les installations de pompage.

- L'utilisation de retardateurs de prise pour contrôler la prise à court terme.
- un additif est ajouté dans la tête d'impression pour permettre une meilleure solidification du matériau.

II.B.1. Objectif :

L'objet du travail est la combinaison de l'impression 3D et de la valorisation de ressources secondaires provenant du recyclage des déchets de construction et de démolition.

II.B.2. Choix et caractérisation des matériaux :

Les matériaux ont été choisis selon plusieurs critères.

On s'appuie principalement sur la littérature pour orienter le choix des matériaux et de leur dosage. Comme il a été vu récemment, le processus d'impression 3D requiert un usage ainsi qu'un dosage en matériaux bien spécifique, ceci afin de pouvoir fabriquer un mortier suffisamment fluide pour être pompable, mais suffisamment ferme pour qu'il puisse tenir en place lors de son dépôt couche par couche [14][42][44][45].

II.B.2.1 Ciment :

Le ciment utilisé dans le cadre des tests est un ciment Portland de type CEM I 52,5 N.

Ce type de ciment est composé presque exclusivement de clinker. L'utilisation de ce type de ciment permettra de développer dans le mortier imprimable des résistances élevées au jeune âge mais aussi à plus long terme. Les caractéristiques de ce ciment sont présentées dans le tableau 10 et la fiche technique est disponible dans l'annexe D.

Masse volumique absolue (kg/m^3)	3100
Résistance minimale à 2 jours (MPa)	18
Résistance minimale à 28 jours (MPa)	50

Tableau 10 : Caractéristiques du CEM I 52,5 N

II.B.2.2 Fines de briques :

Dans le cadre de ce mémoire, le but est de tester une substitution ciment-brique au sein des formulations de mortiers imprimables. Les briques ont donc été transformées en fines et mises en œuvre de sorte qu'elles soient identiques au ciment d'un point de vue granulométrique.

Les briques ont tout d'abord été transférées dans un concasseur à mâchoires. Après ce traitement, les granulats ont été broyés pendant 40 minutes dans un broyeur à boules en acier [43].



Figure 47 : Fines de brique utilisées dans les compositions.

Quelques caractéristiques de ces fines de briques sont présentées dans le tableau 11.

Masse volumique absolue (kg/m^3)	2860
Surface spécifique (cm^2/g)	8100

Tableau 11 : Caractéristiques des fines de briques [52].

La Figure II.24 permet d'avoir un comparatif entre les courbes granulométriques du CEM I 52,5 N et des fines de briques. On remarque un léger décalage qui indique que le ciment semble plus fin que les fines de briques. On observe aussi une plus grande concentration de fines et d'ultrafines pour la poudre de brique (20% de la part granulométrique est inférieure à 5µm).

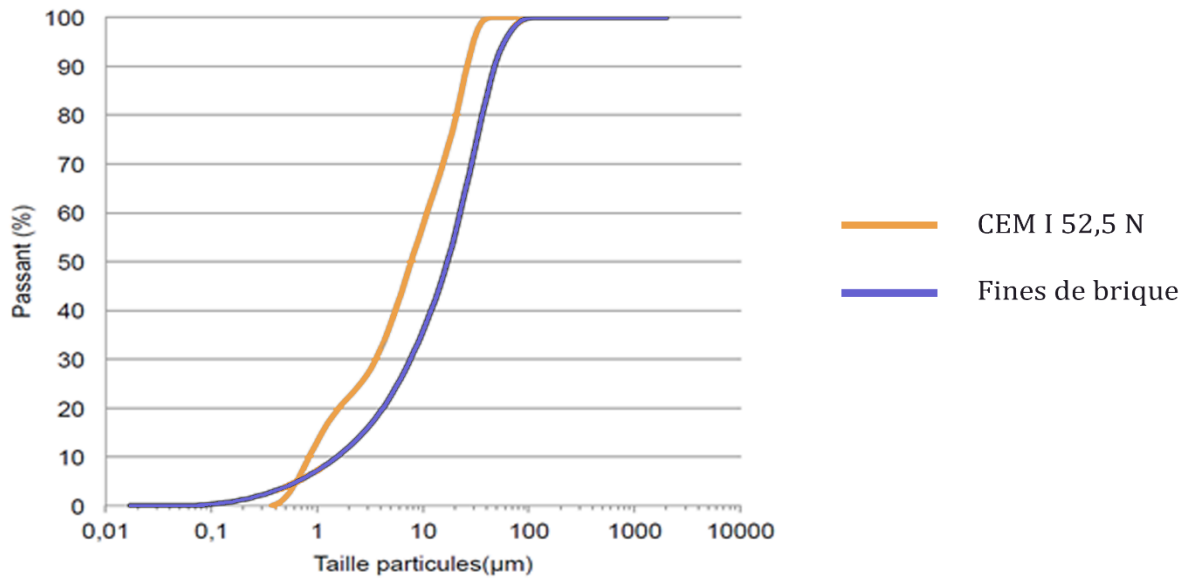


Figure 48 : Répartition granulométrique des fines de brique et du ciment.

La composition chimique des briques (Tableau 11) ont également été caractérisées par une analyse en fluorescence X

Éléments	Briques (% Oxydes)
SiO ₂	65.7
Al ₂ O ₃	13.8
Fe ₂ O ₃	8.5
K ₂ O	2.5
MgO	2.3
CaO	2.1
TiO ₂	1.8
Na ₂ O	1.4
SO ₃	0.8
Total	98.6

Tableau 12 : Composition chimique des fines de briques [52].

On remarque la forte présence d'oxydes de silicium, d'aluminium et de fer. Ceci confirme la présence logique de minéraux aluminosilicatés, issus de l'argile utilisée pour la fabrication des briques.

Cette caractérisation permet d'affirmer ce qui a été vu précédemment avec le test par fluorescence X. On observe une teneur majoritaire en minéraux de type quartz et hématite, cela confirme le fait que la composition de ces briques suit une composition standard [43].

II.B.2.3 Sable :

Le sable utilisé dans les formulations est un sable normalisé de granulométrie 0/2mm [EN 196-1] (Figure 49). Ce choix a été fait pour plusieurs raisons. D'une part, la normalisation du sable implique que les échantillons préparés sont homogènes. Ceci est aussi bien valable pour leur granulométrie que pour leur taux d'humidité et leurs résistances mécaniques. De cette façon, les incertitudes concernant ces variables sont minimisées.

D'autre part, ce matériau est facilement accessible, ce qui ajoute une dimension de reproductibilité au protocole dans le cas où d'autres expériences de type seraient engagées dans le futur. Enfin, ce type de sable présente des dimensions et une granulométrie idéale pour les formulations de mortiers imprimables, car le diamètre maximal des grains présente une marge confortable par rapport au diamètre des buses des imprimantes 3D.

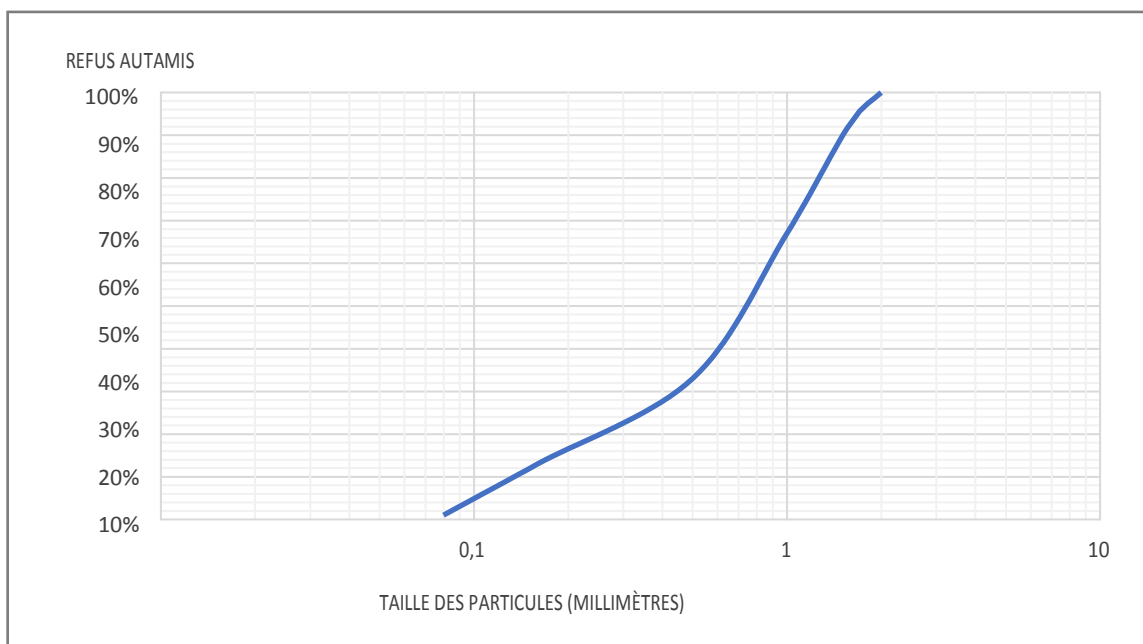


Figure 49 : Courbe granulométrique du sable normalisé [53].
La masse volumique de ce sable normalisé est équivalente à 2640 kg/m³.

II.B.2.4 Adjuvants :

Le dosage en eau des formulations de mortiers imprimable est généralement très faible. Par conséquent, le recours à l'usage d'adjuvants pour ce type de mortier est courant. Dans ce travail, on utilise un adjuvant de type superplastifiant appartenant à la famille des éthers polycarboxyliques modifiés. Celui-ci a l'avantage

d'être fourni en petite dose (300 ml), à l'échelle des tests laboratoires effectués. Il est actuellement fabriqué par L'entreprise Ultibat et sa fiche technique est fournie en annexe E.

II.B.3. Méthode de formulation et de composition :

II.B.3.1 Détermination de la composition témoin :

La technologie d'impression 3D étant relativement récente, la manière de composer les mortiers associés à ce processus n'est pas encore fixée. De nombreuses propositions ont été réalisées, dont l'imprimabilité a été testée. Les dosages des constituants restent parfois très différents [42]. De plus, les essais permettant de caractériser les matériaux cimentaires imprimables, à l'état frais ainsi qu'à l'état durci, ne sont pas encore normalisés. Il est donc aujourd'hui difficile de fixer une méthode de formulation qui puisse satisfaire des exigences liées à des essais non-normalisés.

Ainsi, on choisit dans ce travail de prendre pour base une formulation « standard » qui présente des dosages massiques respectant totalement les grands principes énoncés en I.3.3. Cette formulation standard a fait l'objet de tests d'imprimabilité concluante, et des mesures des performances mécaniques à l'état durci ont été réalisées [14]. Les composants utilisés ne seront néanmoins pas tous identiques, la formulation « standard » utilise un sable roulé 0/2mm non normalisé, et le ciment est un CEM II dont la performance n'a pas été précisée.

C'est donc une formulation aux dosages reposant sur des tests réalisés dans la littérature qui est proposée dans ce mémoire. Le choix des matériaux a été fait de manière à ce que ceux-ci présentent les caractéristiques les plus homogènes possible. Cela dans le but de pouvoir comparer les résultats qui seront obtenus avec de futures études présentant la même base de formulation. Celle-ci a été réalisée suivant le dosage massique suivant :

Élément	Dosage en proportion massique
Ciment CEM I 52,5 N	1
Sable normalisé 0/2 [EN 196-1]	1,4
Superplastifiant Ultibat	0,3% en masse du ciment
Eau	0,35

Tableau 13 : Dosage utilisé pour la composition témoin.

A partir de cette formulation de base (Tableau 12), on définit une composition témoin notée S00 (substitution 00%). Cette composition est essentielle dans la mesure où elle permettra de statuer sur les performances de base du mortier, sans substitution. Cela permettra d'établir de futures comparaisons avec les mortiers présentant une substitution non-nulle.

Les tests réalisés dans la littérature sur mortiers traditionnels mentionnent le fait qu'une substitution de ciment par des fines de briques permet de garder de bonnes performances jusqu'à un taux de substitution de l'ordre de 30% [43]. Pour cela, on choisit dans ce travail d'aller légèrement au-delà et de se pencher sur des substitutions allant jusqu'à 35%.

Afin d'appréhender de manière précise l'évolution des performances en fonction du degré de substitution, on réalisera des substitutions par incréments de 5%. On aura ainsi 8 formulations différentes à réaliser allant de la formulation S00 à la formulation S35 (substitution 35%).

Les différentes compositions sont, dans un premier temps, testées sur des mortiers coulés et fabriqués de manière normalisée. D'une part, cela permettra d'avoir une première idée du comportement de telles formulations à l'état frais et à l'état durci, et, d'autre part, d'appréhender l'influence de l'incorporation de fines de briques sur les performances du mortier coulé.

II.B.3.2. Compositions pour tests normalisés :

Les compositions des mortiers imprimables sont faites en fonction du dosage défini précédemment. Les quantités de matériau nécessaires dépendent du nombre d'échantillons à réaliser. On choisit dans ce mémoire de réaliser 9 barrettes de 4*4*16cm par formulations. Un tel nombre a été choisi afin de s'assurer d'avoir suffisamment de données pour fournir des résultats représentatifs lors de la réalisation des tests qui seront décrits par après.

Un élément important à prendre en compte lors de la réalisation des compositions est le dosage en sable normalisé. Celui ne peut se faire qu'en intégrant l'intégralité du contenu des sachets présents (sachets normalisés de 1350g). En effet, cela est nécessaire dans le but d'avoir une courbe granulométrique du sable qui soit en cohérence avec les spécifications données. Par conséquent, les quantités de matériaux seront calibrées en fonction de la quantité de sable normalisé présente dans la formulation.

L'incorporation d'un unique sachet de sable ne permet pas d'obtenir un volume de mortier suffisant pour la réalisation des 9 barrettes normalisées. Pour toutes les compositions, deux sachets de sable normalisé sont utilisés, soit l'équivalent de 2,7 kg.

A partir de ces données, on obtient la formulation « témoin » S00 présentée dans le Tableau 13.

Formulation	CEM I (kg)	Sable (kg)	Fines de brique (kg)	Eau (L)	Superplastifiant (mL) (0,3%C)	E/C	E/S	% FS
S00	1,92	2,7	0	0,68	5,7	0,35	0,15	71,2

Tableau 14 : Quantités massiques utilisées dans la composition témoin.

Le rapport E/S désigne le rapport massique entre la quantité d'eau ajoutée et la quantité de solide (ciment, sable et fines de brique) présent dans la composition. La dernière colonne présente la fraction volumique solide (%FS). Les prescriptions indiquent qu'il est préférable de ne pas dépasser une valeur de 80%, ce qui est le cas pour cette formulation « témoin »[14].

II.B.3.3. Compositions de substitution:

Les substitutions du ciment par les fines de briques seront des substitutions massiques réalisées par incréments de 5%. Plusieurs hypothèses vont être prises en compte pour l'élaboration de ces compositions.

Dans un premier temps, on choisit de négliger l'éventuel phénomène d'absorption d'eau par les fines de briques. La raison principale de ce choix réside dans le fait que les briques utilisés ont la même origine et quasiment la même caractérisation que celle utilisés dans une précédente étude [36]. Celle-ci ne montrait pas spécifiquement que l'incorporation de fines de briques nécessitait un apport d'eau supplémentaire, la maniabilité se trouvant inchangée. Par conséquent, aucun ajout d'eau supplémentaire ne sera réalisé dans les formulations présentant des substitutions.

On choisit également de fixer le rapport E/S à 0,15. Ceci permettra de garder une fraction volumique solide quasiment constante égale à 71%.

On prend donc la décision de fixer cette variable qu'est la quantité d'eau : la dose ajoutée sera identique pour tous les mélanges. Ces décisions impliquent le fait que le rapport E/C ne sera pas constant. La substitution du ciment par les fines impliquera une baisse de la teneur en ciment pour une même quantité d'eau, ce qui entraînera une hausse du rapport E/C.

Néanmoins, cette hausse du rapport E/C sera corrélée avec une baisse de la quantité de superplastifiant. En effet, le dosage en adjuvant sera aussi fixé à 0,3% de la masse du ciment. Cette masse diminuant avec l'incorporation de fines de briques, la quantité d'adjuvant diminuera donc également.

la composition témoin est présentée (Tableau 14), avec en fond rouge les variables qui seront constantes lors des essais de substitution.

Formulation	CEMI (kg)	Sable (kg)	Fines de brique (kg)	Eau (L)	Superplastifiant (mL) (0,3%C)	E/C	E/S	%FS
<i>S00</i>	1,92	2,7	0	0,68	5,7	0,35	0,15	71,2

Tableau 15 : Aperçu des quantités massiques et grandeurs gardées constantes au cours des tests.

A partir de ces hypothèses et variables fixées, les sept formulations présentant des substitutions allant de 5 à 35% de la masse de ciment sont déterminées et présentées dans le tableau 15.

Formulation	CEMI (kg)	Sable (kg)	Fines de brique (kg)	Eau (L)	Superplastifiant (mL) (0,3%C)	E/C	E/S	%FS
S05	1,83	2,7	0,10	0,68	5,5	0,35	0,15	71,2
S10	1,73	2,7	0,19	0,68	5,2	0,39	0,15	71,2
S15	1,63	2,7	0,28	0,68	4,9	0,41	0,15	71,2
S20	1,53	2,7	0,38	0,68	4,6	0,44	0,15	71,2
S25	1,44	2,7	0,47	0,68	4,3	0,47	0,15	71,3
S30	1,34	2,7	0,58	0,68	4,0	0,50	0,15	71,3
S35	1,25	2,7	0,68	0,68	3,7	0,54	0,15	71,3

Tableau 16 : Compositions de substitution.

II.B.3.4.Réalisation des mortiers:

Les mortiers ont été réalisés selon un procédé normalisé. Un malaxeur permettant les mélanges de compositions allant jusqu'à 5kg a été utilisé. Une fois tous les éléments pesés le protocole décrit dans le tableau 16 a été suivi :

Étapes	Actions	Vitesse de malaxage	Temps de malaxage	Temps Total
1	Introduction : Eau & Adjuvant	1	30''	30''
2	Introduction : Ciment & Fines	1	30''	1'00''
3	Introduction progressive : Sable	1	30''	1'30''
4		2	30''	2'00''
5	Durant les premières 30'' : Racler les parois et le fond du malaxeur.	Arrêt	1'30''	3'30''
6		2	1'00	4'30''

Tableau 17 : Étapes suivies pendant la réalisation des mortiers.

Une fois le mortier réalisé, celui-ci a été disposé dans des moules normalisés (Figure 50). Selon le protocole décrit dans le tableau 17.



Figure 50 : des moules utilisés et de la table à secousses.

Étapes	Actions
1	Huiler et fixer les moules sur la table à chocs.
2	Introduire le mortier de sorte à ce qu'il remplisse la moitié des 3 barrettes.
3	Niveler la couche déposée.
4	Mettre en marche la table à secousses pour la réalisation de 60 chocs.
5	Introduire le mortier de sorte à remplir le moule, avec un léger surplus.
6	Niveler la couche déposée.
7	Mettre de nouveau en marche la table à secousses pour 60 chocs.
8	Retirer le moule de la table à secousses.
9	Enlever l'excès de mortier à l'aide d'une règle métallique.
10	Enlever les éventuels restes de mortier sur la surface du moule.

Tableau 18 : Étapes suivies lors de la mise en place du mortier dans les moules

Les moules sont placés en chambre humide durant 24 heures ($20 \pm 2^\circ\text{C}$; 95% HR). Ils sont ensuite démoulés et les moules nettoyés. Après cela, les barrettes sont immergées dans l'eau pour une durée variant en fonction des tests à réaliser.

II.B.4. Essais à l'état frais :

Cette partie décrit la manière dont ont été effectués les tests sur mortiers frais. En plus des deux tests présentés, une mesure de la masse des moules, avant et après remplissage, a permis de mesurer la masse volumique à l'état frais.

II.B.4.1. Mesure de l'étalement à la table à secousses:

But de l'essai :

Le but de cet essai est de donner une première caractérisation du mortier en termes rhéologiques. La comparaison des étalements de la composition témoin et des compositions substituées serviront à montrer si les substitutions ont tendance à modifier le comportement rhéologique du matériau.

Mode opératoire :

Les essais ont été réalisés directement après la mise en œuvre du mortier, afin d'appréhender au mieux le comportement rhéologique du matériau en sortie du malaxeur. En effet, lors du processus d'impression 3D, le matériau est malaxé puis envoyé directement vers la machine d'impression.

Chaque formulation a fait l'objet d'un test d'étalement décrit ci-dessous (Tableau 18).

Étapes	Actions
1	Nettoyer et humidifier le disque de la table à secousses ainsi que le moule tronconique à l'aide d'une serviette humide.
2	Placer le moule au centre de la table à secousses et insérer le mortier afin de remplir la moitié du moule. Durant ce remplissage, maintenir fermement d'une main le moule sur le disque.
3	Compacter la couche de mortier à l'aide de 10 coups brefs de dame.
4	Insérer une seconde couche de mortier afin de remplir le moule et recompresser l'ensemble par 10 nouveaux coups de dame.
5	Éliminer l'éventuel excédent de mortier à l'aide d'un couteau à raser.
6	Soulever lentement et verticalement le moule.
7	Réaliser 15 secousses sur la table à fréquence constante (1 par seconde).
8	Mesurer le diamètre de l'échantillon dans deux directions perpendiculaires.
9	Calculer la moyenne des deux diamètres.

Tableau 19 : Étapes suivies lors de la réalisation de l'essai d'étalement [NBN EN 1015-3].

L'essai réalisé est un essai d'étalement à la table à secousses [NBN EN 1015-3] (Figure 51) permettant de statuer sur le comportement rhéologique du mortier.

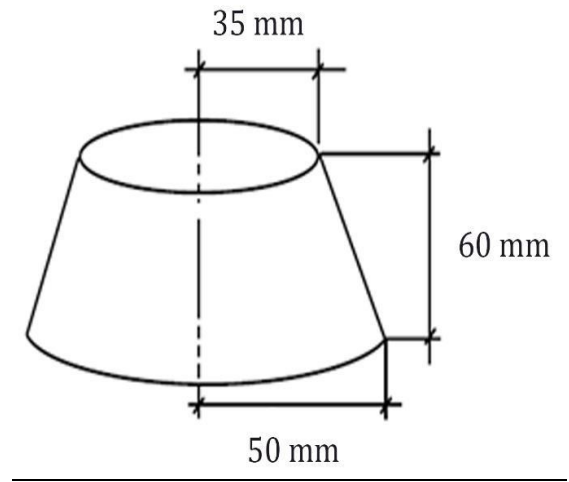


Figure 51 : Table à secousses et dimensions du dispositif tronconique.

La valeur de l'étalement seule ne permet pas de décrire le comportement rhéologique du mortier. Seules des comparaisons sont possibles entre les valeurs d'étalement pour analyser l'influence de la substitution des fines de briques par le ciment.

Des corrélations ont été réalisées permettant de lier des valeurs géométriques comme l'affaissement et l'étalement à des variables intrinsèques du matériau.

Dans le cas de l'essai au mini-cône, deux types de corrélations ont été effectuées (Une en régime d'affaissement, une en régime d'étalement).

Ne peut pas utiliser la corrélation liant l'étalement au seuil de cisaillement dans ce cas. D'une part, cette corrélation est valable pour un protocole d'essai pendant lequel on retire le cône, sans appliquer les quinze secousses. D'autre part, dans le cas des mortiers imprimables, on ne se situe pas dans un régime d'étalement mais plutôt dans un régime d'affaissement, car le matériau est sensé rester en place une fois démoulé et ne pas s'écouler. On utilisera donc la relation suivante (Equation II.2) [54] liant la hauteur h finale de l'échantillon, sa masse Volumique ρ à l'état frais au seuil de cisaillement τ_0 .

$$\tau_0 = \frac{\rho g h}{2} \quad \text{Equation II.2}$$

L'observation du comportement du mortier une fois le moule retiré, avant l'application des quinze secousses, permet d'avoir un ordre d'idée de l'affaissement de celui-ci. Les valeurs prises seront données avec une incertitude, et permettront un calcul du seuil. Ce calcul est plutôt indicatif, tant les incertitudes liées aux corrélations et au protocole employé sont grandes.

II.B.4.2.Mesure du temps de prise:

But de l'essai :

La mesure du temps de prise des mortiers destinés à être imprimés en 3D est primordiale dans la mesure où cela donnera un indicateur de la durée pendant laquelle le matériau pourra rester maniable et imprimable.

Mode opératoire :

Le temps de prise a été mesuré sur un appareil de Vicat automatique [NF EN 196-3]. Deux compositions ont été testées, présentant une différence importante au niveau des taux de substitution, A cause de la durée de l'essai (14-15h).

Étapes	Actions
1	Nettoyer et huiler le moule cylindrique ainsi que le disque de support.
2	Placer le moule au centre du disque et insérer le mortier. Durant ce remplissage, maintenir fermement d'une main le moule sur le disque.
3	Compacter la couche de mortier à l'aide de 10 coups brefs de dame.
4	Éliminer l'éventuel excédent de mortier à l'aide d'un couteau à raser.
5	Placer l'ensemble disque + moule sur la plateforme de l'appareil de Vicat.
6	Entrer les paramètres de mesure et lancer le test
Paramètres de mesure	
Type de chute	Libre
Type d'intervalle de temps entre les mesures	Fixe
Intervalle de temps entre les mesures	10 minutes

Tableau 20 : Étapes suivies durant l'essai de prise et paramètres de mesure utilisés.



Figure 52 : Dispositif utilisé appareil vicat automatique

Ce test automatisé reprend le principe du test de Vicat où l'on mesure l'enfoncement d'une aiguille dans un matériau cimentaire en fonction du temps. Le diamètre de l'aiguille est égal à 1mm. Le mortier frais est quant à lui placé dans un moule cylindrique d'une hauteur de 40mm pour un diamètre intérieur de 60mm.

Cet essai peut aussi permettre, dans une certaine mesure, de caractériser le mortier en termes rhéologiques. La littérature fournit quelques corrélations existant entre les mesures par pénétrométrie et les variables intrinsèques telles que le seuil de cisaillement. Concernant l'essai de Vicat, une relation permet de faire le lien entre le rayon R de l'aiguille, son enfoncement h et le seuil de cisaillement du matériau. Cette équation n'est valable que pour un appareil dont la masse appliquée à l'aiguille est égale à 300g (Equation II.3) [51].

$$\tau_0 = \frac{3}{2\pi R h} \quad \text{Equation II.3}$$

II.B.5. Essais à l'état durci :

II.B.5.1. Essais en flexion et compression à 7 et 28 jours:

Concernant les essais effectués à l'état durci, on a choisi de réaliser neuf barrettes par composition soit 72 barrettes au total. Parmi les neuf barrettes (Figure 44), six sont utilisées pour les essais en compression/flexion et trois pour les mesures d'absorption par immersion.

But de l'essai :

A travers les essais mécaniques réalisés, plusieurs problématiques seront intéressantes à analyser. Premièrement, les mesures réalisées sur la composition témoin donneront une idée du niveau de performance du mortier. Ensuite, l'impact de la substitution du ciment par les fines de briques. Des comparaisons entre les performances des mortiers coulés et celles des mortiers imprimés. Il sera donc possible d'avoir des performances que présenterait ce mortier s'il était mis en œuvre au sein d'un procédé d'impression.

Mode opératoire :

Chaque composition comporte six barrettes qui sont immergées directement après leur démoulage dans une eau maintenue à température ambiante. Trois d'entre elles sont utilisées pour les tests à 7 jours, le reste pour les tests à 28 jours.

Pour résumer, chaque composition a trois mesures de résistance en flexion et six mesures de résistance en compression, pour des durées d'immersion de 7 et 28 jours. Ce nombre de données permettra, comme il a été mentionné précédemment, d'avoir des valeurs de performances représentatives des compositions proposées. Enfin, le protocole de test des essais de flexion permet aussi de fournir la masse volumique des échantillons testés. Ceci permettra d'appréhender l'influence que pourrait avoir l'incorporation des fines sur la densité du matériau cimentaire.

II.B.5.1.Essais d'absorption par immersion totale :

But de l'essai :

L'essai d'absorption d'eau par immersion est un test permettant de déterminer de manière quantitative la capacité qu'aura un mortier à absorber l'eau. Plus l'absorption est élevée, plus le mortier sera jugé comme étant poreux.

Mode opératoire :

Les trois barrettes ont été immergées dans des bacs d'eau à température constante. Elles ont été maintenues immergées jusqu'à ce que celles-ci soient saturées en eau leur rapport de masse entre deux pesées (faites à 24 heures d'intervalle) soit inférieur à 0,1%. Puis placées dans une étuve à une température de 105°C pour séchage. Les barrettes sont ensuite pesées tous les jours et sont considérées comme sèches lorsque le rapport de masse entre deux pesées est inférieur à 0,1%. Les barrettes sont ensuite pesées tous les jours et sont considérées comme sèches lorsque le rapport de masse entre deux pesées est inférieur à 0,1%. L'absorption d'eau notée A est ensuite définie par l'équation suivante :

$$A = \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{sec}}} * 100 \quad \text{Equation II.4}$$

Avec M_{sat} la masse de l'échantillon saturé en eau et M_{sec} la masse de l'échantillon sec.

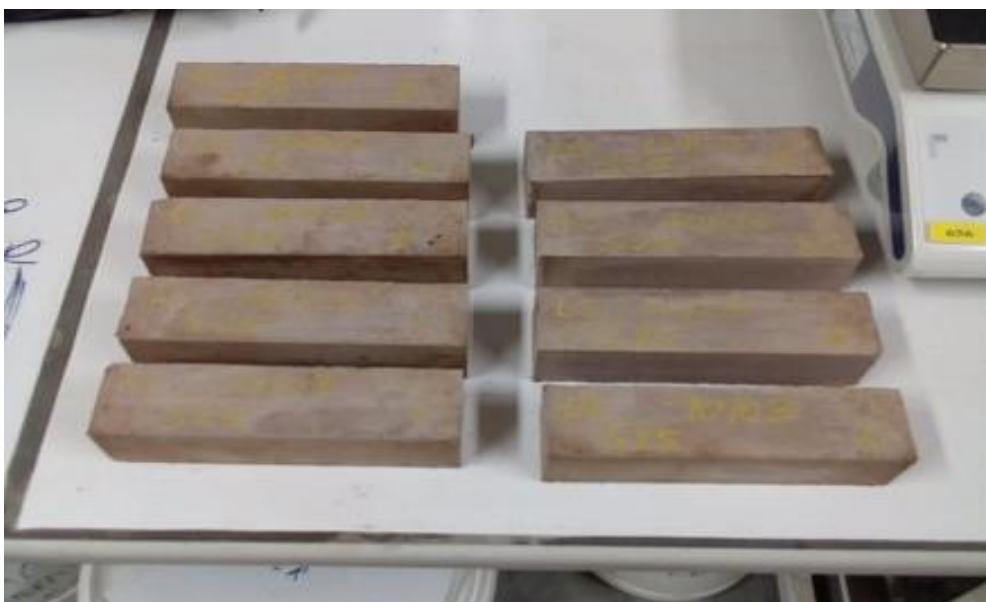


Figure 53 : Des barrettes réalisées pour une composition.

II.B.6. Analyse des résultats :

II.B.6.1.Résultats à l'état frais:

II.B.6.1.1.Mesure de l'étalement à la table à secousses :

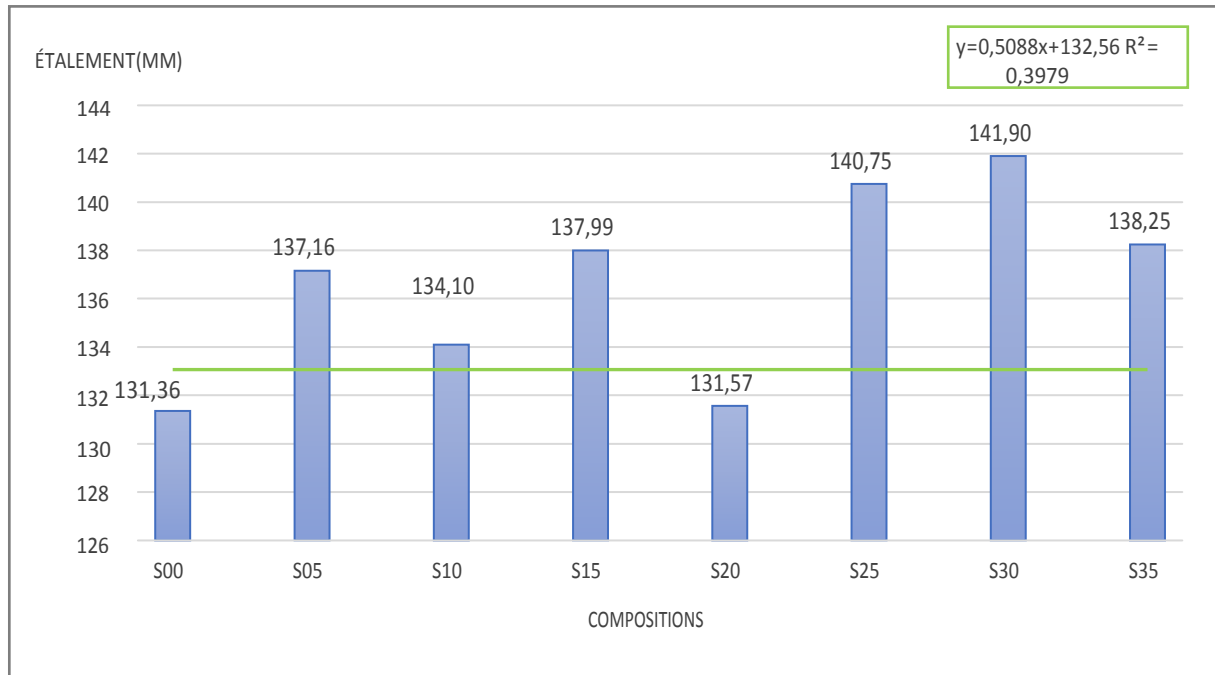


Figure 54 : Résultats de l'essai d'étalement en fonction du degré de substitution.

La Figure 54 présentées Les valeurs d'étalement obtenues.

- L'augmentation du taux de substitution de fines de briques semble avoir tendance à augmenter la valeur de l'étalement.

-Dans ce travail, On a choisi de garder un rapport eau/poudre constant, et plus un rapport eau/solide constant, le dosage en superplastifiant est aussi fixé mais sa quantité diminue lorsque le taux de substitution augmente. Le rapport eau/ciment augmente lorsque la teneur en fines augmente.

- L'augmentation du rapport eau/ciment entraîne une amélioration de la consistance du béton frais. Cette augmentation de la mesure d'étalement peut en être la conséquence.

Chaque échantillon, une fois démoulé et avant les secousses, reste bien en place et garde la forme du moule tronconique. L'affaissement observé est très faible, qui était en général quasiment identique pour toutes les compositions. De valeur d'affaissement h suivant : $h = [4 ; 8 \text{ mm}] = 6 \pm 2 \text{ mm}$.

Cette détermination, associée à la mesure de la masse volumique du mortier à l'état frais, permet d'appliquer la formule de corrélation entre l'affaissement h et le seuil de cisaillement τ_0 .

Composition	S00	S05	S10	S15	S20	S25	S30	S35
$\rho(kg/m^3)$	2269	2255	2229	2214	2228	2243	2204	2208

Tableau 21 : Masse volumique des compositions à l'état frais.

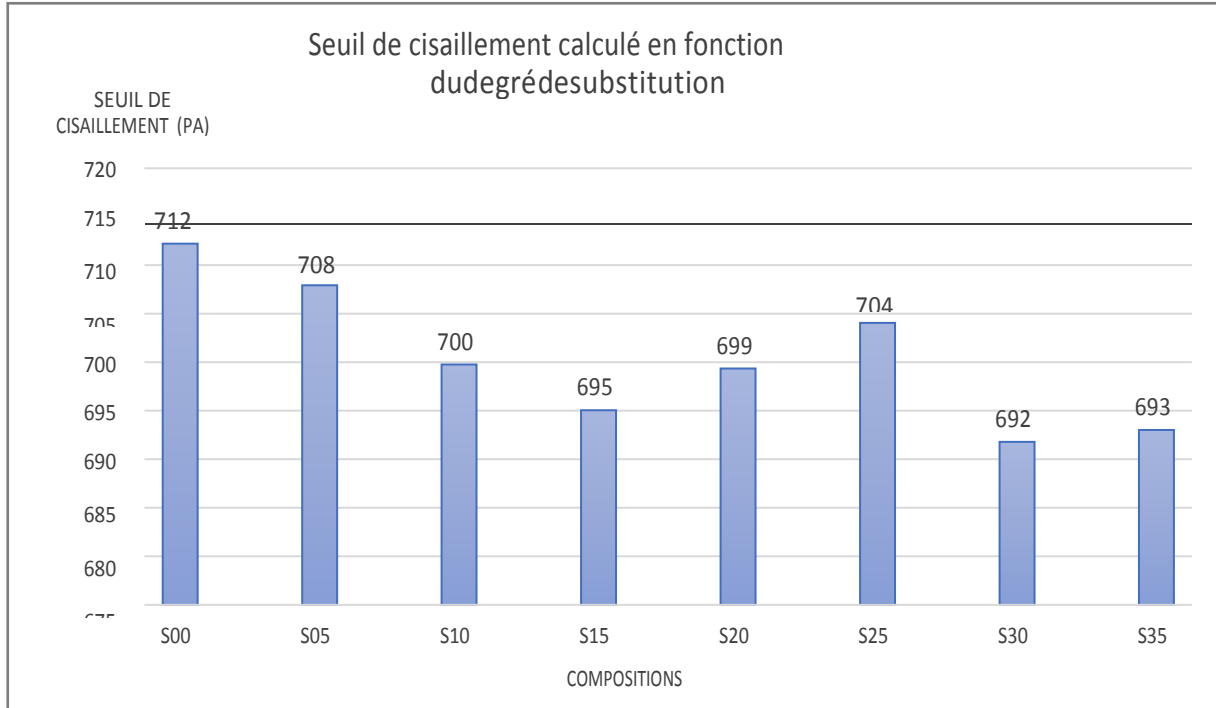


Figure 55 : Estimations de valeurs de seuil de cisaillement.

-le seuil de cisaillement est proportionnel aux valeurs d'affaissement et de masse volumique. Par conséquent, qui à diminuer lorsque le taux de fines de briques augmente.

-l'élément influençant la variation de ce seuil est donc la masse volumique, aussi qui a diminuer avec l'incorporation de fines de brique.

- Des matériaux cimentaires avec un seuil de cisaillement de l'ordre de 1kPa ont déjà pu être mis en œuvre par le procédé d'impression 3D [14].

-Avec Les valeurs obtenues ici, ce matériau, en termes rhéologiques, apte à être exploité dans un dans l'impression 3D des mortiers.

- mais il est nécessaire de procéder à d'autres essais expérimentaux, pour vérifier les critères d'extrudabilité et de constructibilité de ce matériau.

II.B.6.1.2.Mesure du temps de prise:

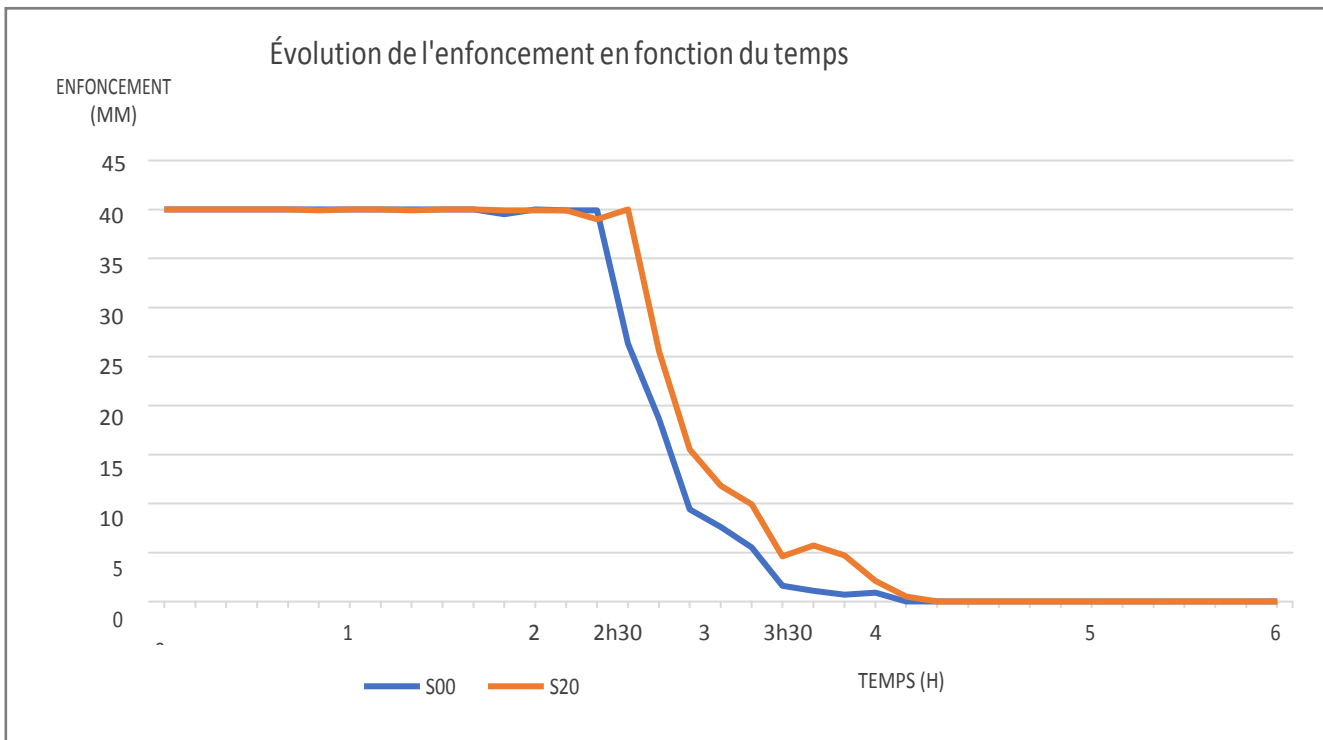


Figure 56 : Temps de prise.

La figure 56 présente le résultat graphique de l'essai automatique de Vicat sur ces deux formulations (S00) et (S20).

-La composition S00 présente une concentration plus importante en ciment, ce qui impliquerait logiquement une prise plus rapide que la composition substituée.

- La vitesse de prise semble être elle aussi impactée par différence de teneur en ciment.
- l'incorporation de fines de briques semble avoir un impact sur le temps de début de prise et la vitesse de prise.

II.B.6.2.Résultats à l'état durci:

II.B.6.2.1 Mesure de la masse volumique :

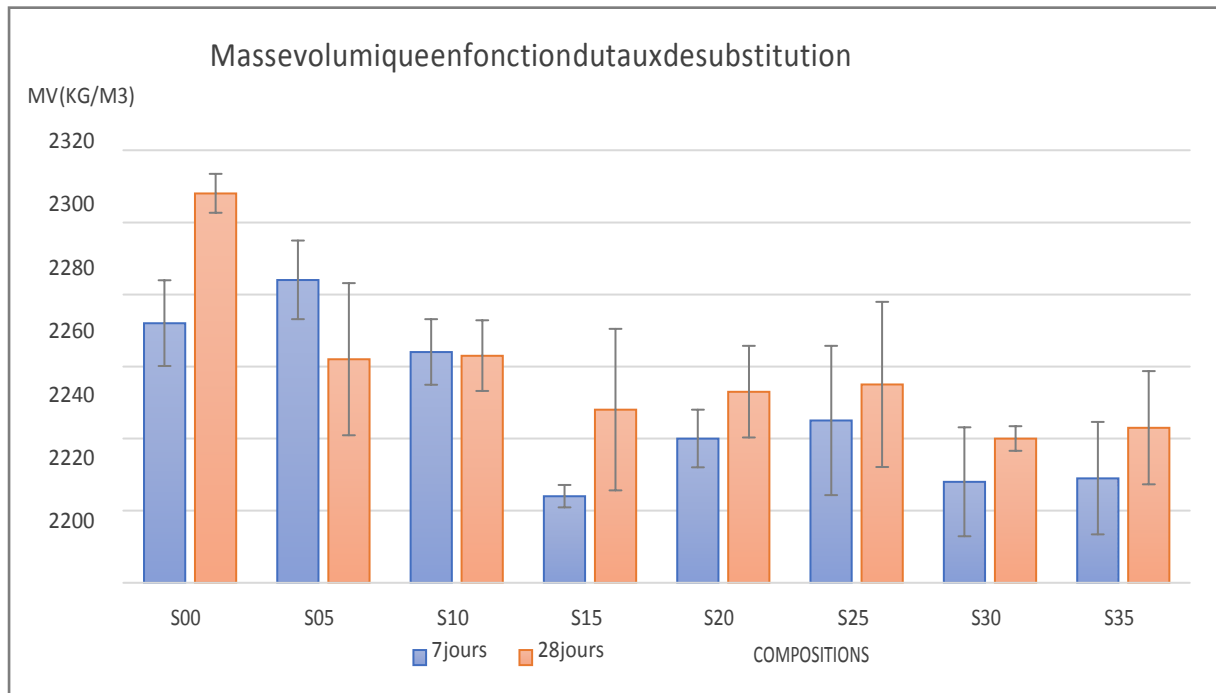


Figure 57 : Masse volumique à 7 et 28 jours.

La Figure 57 présente Les valeurs de masse volumiques mesurées à 7 et 28 jours.

-une tendance claire de diminution de la masse volumique avec l'augmentation du taux de substitution en fines de briques compris entre 2220 et 2320 kg/m³.

-L'intégration des fines de briques dans le mortier semble avoir pour effet de diminuer sa densité, parce que sont moins denses que le ciment (2860 kg/m³ contre 3100 kg/m³).

-l'intégration de fines de briques rendant le mélange plus hétérogène et augmentant la quantité d'air entre les particules.

II.B.6.2.2 Mesure de l'absorption d'eau par immersion:

Les essais d'absorptions ont été réalisés sur 3 barrettes par composition. Celles-ci ont été immergées puis séchées jusqu'à obtention d'une masse constante.

La Figure 58 présente les résultats d'absorption d'eau en fonction du taux de substitution.

On remarque que le taux d'absorption a tendance à augmenter lorsque la quantité de fines de brique de la composition augmente.

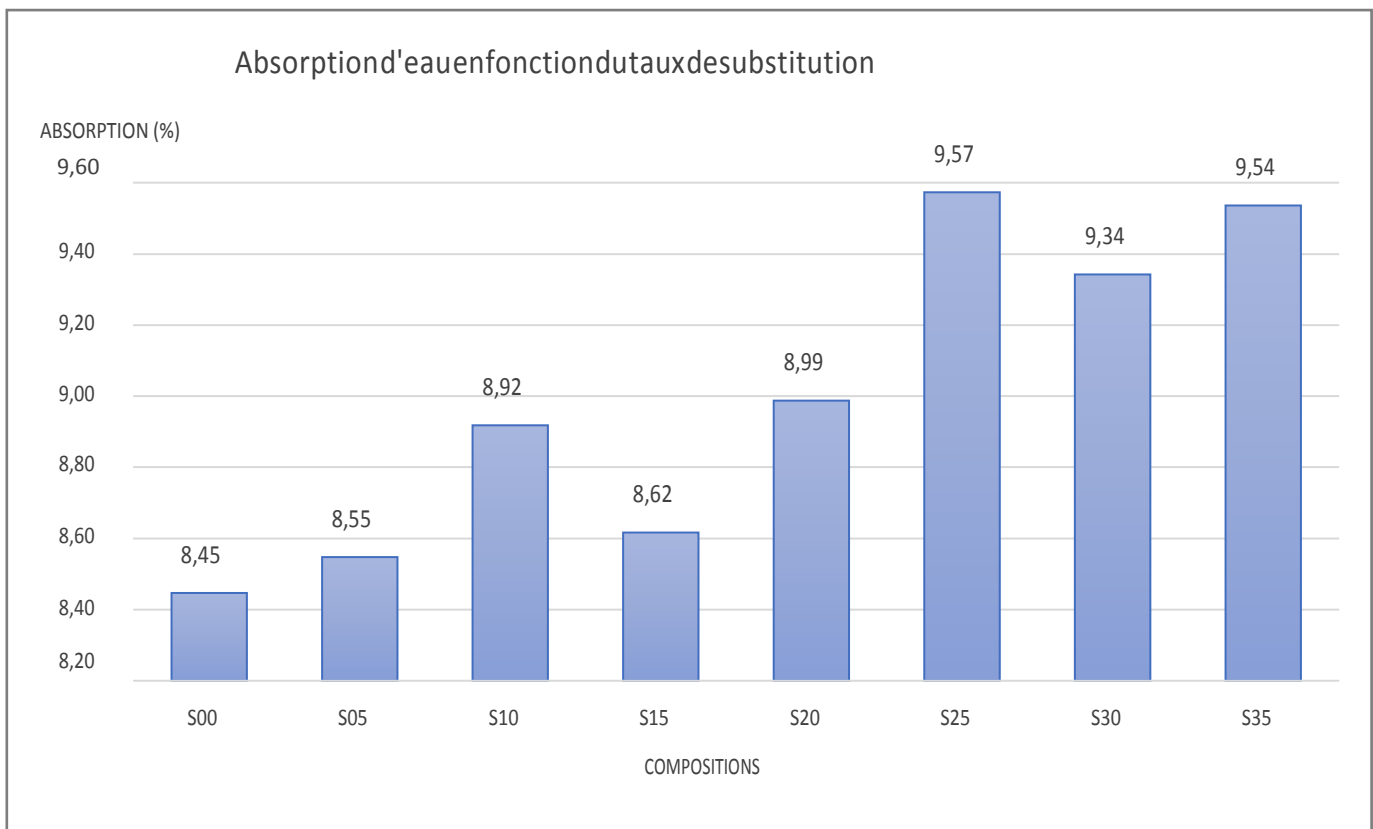


Figure 58 : Résultats des essais d'absorption d'eau par immersion.

- l'absorption d'eau augmente semble logique étant donné que plus le taux de substitution croît, moins la densité du matériau est élevée.

- les fines de brique s'avèrent être un matériau particulièrement poreux, qui influé sur la porosité générale du matériau.

II.B.6.2.3. Mesure de la résistance en flexion :

Les essais ont été réalisés avec 3 barrettes par composition et par période (7 et 28 jours).

La Figure 59 présente les résultats de résistance en flexion du taux des substitutions.

On remarque une nette diminution des performances avec l'augmentation du taux de fines de briques, La composition témoin (S00) présente une résistance de 11,21 MPa à 28 jours par rapport au (S35) est de 8,67 MPa.

- La composition témoin proposée comporte un faible dosage en eau et un type de ciment CEM I 52,5N, ce qui lui confère des bonnes propriétés mécaniques.

- L'incorporation de fines de briques a pour effet de réduire la quantité de ciment, ce qui produit une réaction d'hydratation moindre. Cela entraîne une baisse des propriétés mécaniques.

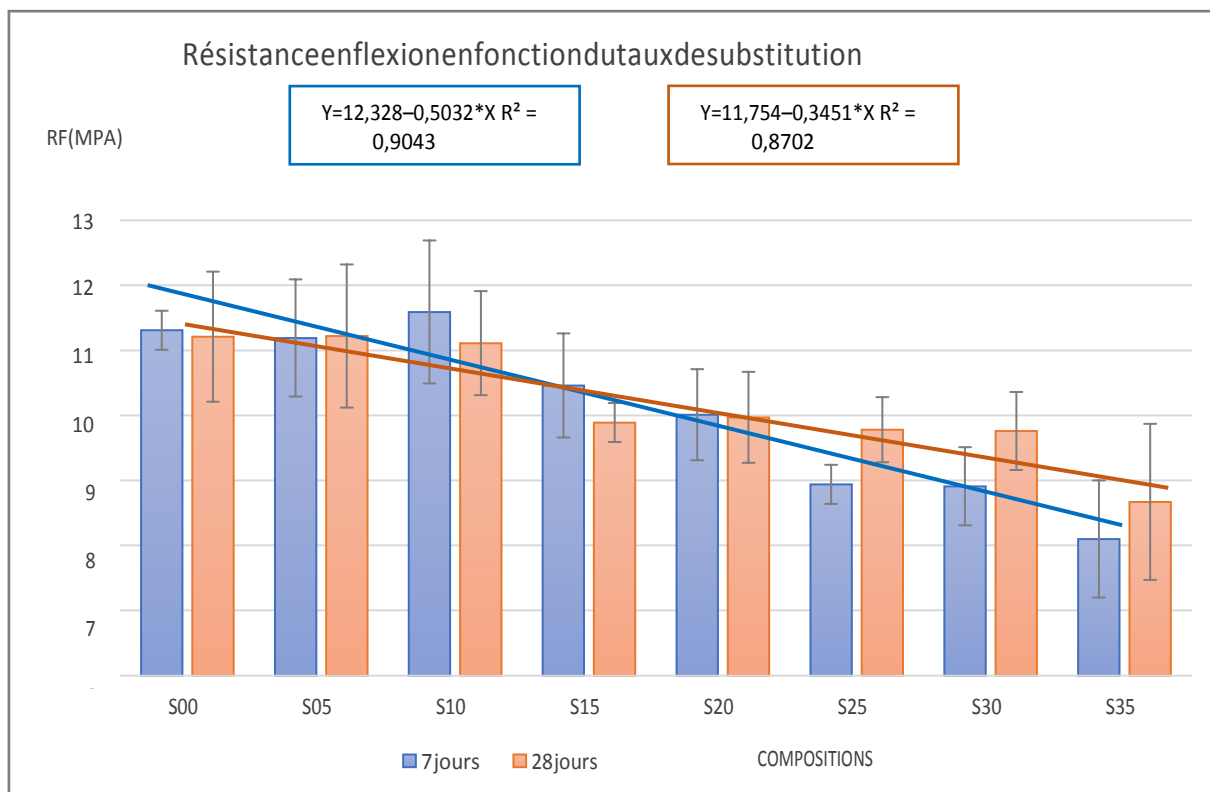


Figure 59 : Essais en flexion à 7 et 28 jours.

II.B.6.2.4. Mesure de la résistance en compression:

Les essais ont été réalisés avec 6 échantillons par composition et par période (7 ou 28 jours).

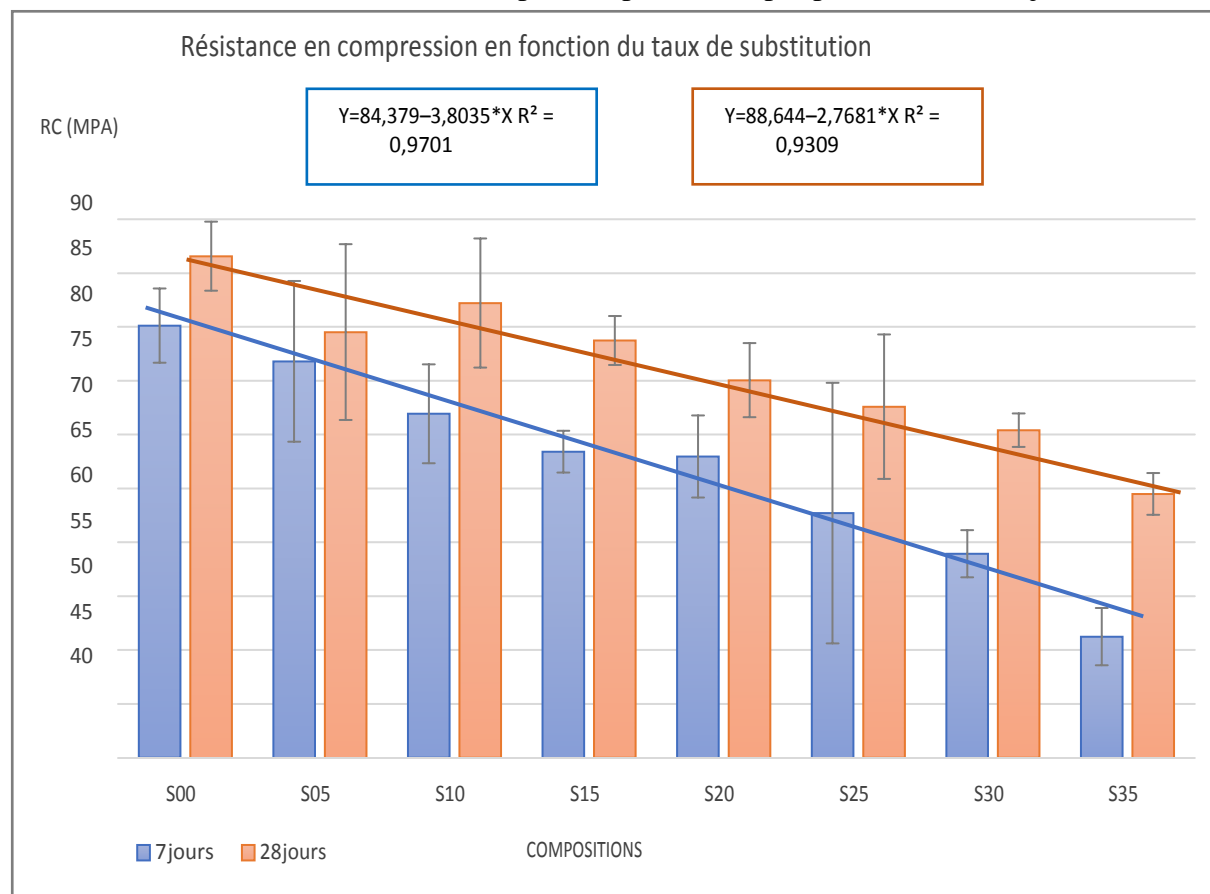


Figure 60 : Résultats des essais en compression à 7 et 28 jours.

La Figure 60 présente les résultats de résistance en compression en fonction du taux des substitutions.

On remarque une diminution des performances avec l'augmentation du taux de fines de briques. La composition témoin S00 présente une résistance de 86,5 MPa à 28 jours tandis que celle de la composition S35 est de 64,5 MPa.

- L'incorporation des fines de briques tend à diminuer les performances en compression, mais la formulation proposée atteint de très bonnes performances à l'état durci dans la gamme des bétons à hautes performances (> 60 MPa à 28 jours).

- Le faible dosage en eau, l'important taux de fines ainsi que le type de ciment sont des facteurs qui participent à ces très bonnes valeurs de résistance.

II.B.7. Conclusion :

Notre consommation des ressources doit s'orienter autour d'une économie circulaire afin de limiter notre impact sur l'environnement. ce problématique est née le sujet de ce mémoire. Le but est d'intégrer des matériaux issus du recyclage dans la composition des bétons destinés à être imprimés en 3D. Ce travail se concentre sur un matériau en particulier : la brique.

L'objectif est de substituer le ciment, dont la production nécessite des matières premières et dégage de grandes quantités de CO₂, par de la poudre de brique. Celle-ci a été mise en œuvre de sorte à avoir des propriétés granulométriques similaires à celles du ciment. Les compositions proposées vont de 5 à 35% de substitution en masse.

Les résultats à l'état frais semblent prometteurs.

- l'intégration de fines de brique semblent impacter très légèrement la maniabilité de la composition témoin.
- Les estimations fournissent des valeurs de seuil qui sont cohérentes avec celles des matériaux imprimables.
- le temps de prise aussi retrouvé impacté par la substitution, de manière également réduite.
- dans le cas où la composition témoin proposée passe effectivement les tests d'imprimabilité, on peut alors imaginer que les compositions substituées soient également imprimables.

A l'état durci.

- une baisse des performances à l'état durci. Entre la composition témoin et la composition la plus fortement substituée, on observe jusqu'à 28% de perte sur les valeurs mesurées en flexion/compression.
- les résistances mesurées restent satisfaisantes puisque la composition substituée à 35% présente des valeurs de résistance en compression et en flexion de respectivement 64,5 et 8,7MPa.

- la littérature montre que l'usage de l'impression 3D a tendance, par l'utilisation du procédé d'extrusion/dépôt, à améliorer les performances mécaniques à l'état durci par rapport à une mise en œuvre traditionnelle. On peut donc supposer que si le matériau venait à être imprimable, celui-ci pourrait voir ses propriétés mécaniques encore améliorées.
- Les tests réalisés pendant ce travail montrent que la substitution du ciment par des fines de briques a une influence sur le comportement des compositions de mortiers imprimables, On peut donc émettre l'hypothèse que l'intégration de matériaux recyclés tels que les fines de brique est possible, jusqu'à une proportion donnée, dans les mortiers imprimables.
- cette hypothèse ne peut pas être totalement confirmée dans ce travail. le contexte actuel n'a pas permis de réaliser les expériences nécessaires (constructibilité et extrudabilité) pour déterminer si le matériau est effectivement imprimable.

Le travail réalisé donc peut servir de base pour de futures études sur les mortiers imprimables, et sur la manière dont ses constituants peuvent être substitués. Dans le cas des fines de briques, tester l'imprimabilité des formulations proposées permettrait de valider les hypothèses avancées. Par la suite, des taux de substitutions plus importants pourraient également être envisagés afin de voir jusqu'à quel point ce type de substitution est envisageable.

Conclusion générale :

Depuis une dizaine d'années, la technologie d'impression 3D du béton connaît un développement spectaculaire. Le marché de l'impression 3D du béton affiche une croissance de près de 15% et les constructions imprimées commencent à voir le jour dans de nombreux endroits du globe. Parallèlement à cela, le domaine de la construction.

D'après les deux études, l'objectif de travail est de formuler des mortiers cimentaires susceptibles d'être imprimés, établir une méthodologie de formulation et de caractérisation d'un liant à prise contrôlée pour l'impression 3D, substituer le ciment par de la poudre de brique.

Pour la méthodologie de formulation, un cahier des charges est établi. Il permet de définir un mortier imprimable comme un matériau extrudable et constructible. L'extrudabilité et la constructibilité sont vérifiées pour formuler des mortiers imprimables au moyen d'un dispositif simplifié permettant de simuler manuellement l'impression à l'échelle du laboratoire (pistolet).

Les résultats obtenus dans ces études expérimentales nous permettent de tirer les conclusions suivantes:

- les bétons imprimés en 3D sont généralement très fermes.
- Le seuil de cisaillement de béton imprimé en 3D est élevée qui nécessite une force considérable pour le être pompé est acheminée jusqu'à la buse de l'imprimante.
- Le temp de prise est contrôler avec l'utilisation des adjuvants, pour s'adapter au procédé, prise lente a permis de construire des structures larges, prise rapide pour structure plus élancé.
- La résistance à la compression des mortiers imprimés est élevée, malgré l'influence des substituions de fine de brique, le mode de mise en œuvre et l'utilisation des adjuvants met en évidence une réduction de la résistance en compression. Les résistances obtenues sur les mortiers imprimés restent toutefois élevés.

Références bibliographies:

- [1]. **Fabulous. (2017).** Impression 3D - Son histoire. Consulté à l'adresse <http://www.fabulous.com.co/guide-impresion-3d/en-bref/histoire/>
- [2]. **Moussion, A. (2019).** Rencontre avec Alain Le Méhauté, l'un des pères de l'impression 3D. Consulté à l'adresse <http://www.primante3d.com/inventeur/>
- [3]. **André, J. C., Le Méhauté, A., & De Witte, O. (1984).** 2567668. Paris : Institut National de la Propriété Industrielle.
- [4]. **American Society for Testing and Materials (ASTM) (2013).** ASTM F2792-10, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.
- [5]. **Gardner, J. (2011).** Exploring the emerging design territory of construction 3D printing project led architectural research.
- [6]. **Schwaiger, J., Lueth, T. and Irlinger, F. (2013)** Generation for a New Printing Process Based on 3D Plastic Polymer Droplet Generation'. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Advanced Manufacturing.
- [7]. **Feng, P. Meng, X., Chen, Ji and Ye, L. (2015),** 'Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders', Construction and Building Materials, 93, pp. 486–497.
- [8]. **Labonnote, N., Rønnquist, A., Manum, B. and Rüter, P. (2016)** Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities', Automation in Construction. Elsevier B.V., 72, pp. 347–366.
- [9]. **Buswell, R.A., Soar R.C., Gibb A.G.F. and Thorpe A. (2007)** Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction', Automation in Construction, 16, pp. 224–231.
- [10]. **Du, W., Bai, Q. and Zhang, B. (2016)** A novel method for additive/subtractive hybrid manufacturing of metallic parts', in 44th Proceeding of the North American Manufacturing Research Institution of SME, p. 1018/1030.
- [11]. **Lim, S., Buswell, R., Le, T., Wackrow, R., Austin, S., Gibb, A. and Thorpe, T. (2012)** Developments in construction-scale additive manufacturing processes', Automation in Construction, 21(1), pp. 262–268.
- [12]. **Pegna, J. (1997)** Exploratory investigation of solid freeform construction.', Automation in Construction, 5, pp. 427–437.
- [13]. **Khoshnevis, B. (2004)** Automated construction by contour crafting – Related robotics and information technologies', Automation in Construction, 13(1), pp. 5–19.
- [14]. **Perrot, A. (2019).** Impression 3D du béton - Etat de l'art et challenges de la révolution de la construction digitale. Londres, Royaume-Uni : ISTE Editions.
- [15]. **Asprone, D., Auricchio, F., Menna, C., & Mercuri, V. (2018)** 3D printing of reinforced concrete elements : Technology and design approach. Construction and Building Materials, 165, 218–231.
- [16]. **Constructions 3D. (2020).** RÉALISATIONS MAXI PRINTER. Consulté à l'adresse <https://www.constructions-3d.com/nos-realisation-maxi-printer>

- [17]. **Joussellin, S. (2017)** Le premier pont en 3D inauguré à Madrid. Consulté à l'adresse <https://www.rtl.fr/actu/futur/le6premier-pont-en-3d-inaugure-a-madrid-7787180935>
- [18]. **3Dnatives. (2019)** La Chine imprime en 3D le pont en béton le plus long du monde. Consulté à l'adresse <https://www.3dnatives.com/pont-imprime-en-3d-chine-25012019/>
- [19]. **Lesage, N. (2017)** En Russie, une startup imprime en un jour une maison en 3D. Consulté à l'adresse <https://www.numerama.com/tech/238578-en-russie-une-startup-imprime-en-un-jour-une-maison-en-3d.html>
- [20]. **3Dnatives. (2019)** Apis Cor participe à la construction du plus grand bâtiment imprimé en 3D à Dubaï. Consulté à l'adresse <https://www.3dnatives.com/batiment-imprime-en-3d-apis-cor-29102019/>
- [21]. [**Malaeb, Z., Hachem, H., Tourbah, A., Maalouf, T., El Zarwi, N. and Hamzeh, F. (2015)** 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design', International Journal of Civil Engineering and Technology, 6(April), pp. 14–22.
- [22]. **Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., and Salet, T. (2016)** 'Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing', Virtual and Physical Prototyping. Taylor & Francis, 11(3), pp. 209–225.
- [23]. **Gosselin, C. et al. (2016)** Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders', Materials and Design, 100, pp. 102–109.
- [24]. **Wolfs, R. J. (2015)** 3D PRINTING OF CONCRETE STRUCTURES GRADUATION THESIS R.J.M. Wolfs', Thesis of Eindhoven University of Technology.
- [25]. **Weller, C., Kleer, R. and Piller, F. T. (2015)** Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited', International Journal of Production Economics, 164, pp. 43–56.
- [26]. **Hu, C. (2010)** Rhéologie des bétons fluides. Consulté à l'adresse <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00523283>
- [27]. **Chuta Caceres, E. (2019)**. Impact de la rhéologie des matériaux cimentaires sur l'aspect des parements et les procédés de mise en place. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01982159>
- [28]. **Roussel, N., Ovarlez, G., Garrault, S. and Brumaud, C. (2012)** 'The origins of thixotropy of fresh cement pastes', Cement and Concrete Research, 42(1), pp. 148–157.
- [29]. **Tattersall, G. H. and Banfill, P. G. F. (1983)** 'The Rheology of Fresh Concrete', Pitman, London.
- [30]. **Roussel, N. (2006)** A thixotropy model for fresh fluid concretes : Theory, validation and applications', Cement and Concrete Research, 36, pp. 1797–1806.
- [31]. **Flatt, R. J. (2004b)** Towards a prediction of superplasticized concrete rheology', Materials and Structures, 37(5), pp. 289–300.
- [32]. **Barnes H.A. (1997)** Thixotropy : A review. Journal of Non Newtonian Fluid Mechanics. 70, 1 – 33.
- [33]. **Billberg, P. (2003)** 'Form pressure generated by self-compacting concrete', Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, RILEM PRO33 Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 271–280.
- [34]. **Ovarlez, G. and Roussel, N. (2006)** A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork', Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 39(286), pp. 269–279.

- [35]. **Perrot, A., Rangeard, D. and Pierre, A. (2016)** ‘Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques’, *Materials and Structures*, 49(4), pp. 1213–1220.
- [36]. **Hameed, R., & Papon, A. (2019)**. Etude numérique du comportement d’un élément en béton imprimé en 3D. Consulté à l’adresse <https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-02119257>
- [37]. **Baz, B., Aouad, G., & Remond, S. (2020)** Effect of the printing method and mortar’s workability on pull-out strength of 3D printed elements. *Construction and Building Materials*, 230, 117002. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117002>
- [38]. **De Schutter, G., & Feys, D. (2016)**. Pumping of Fresh Concrete: Insights and Challenges. *RILEM Technical Letters*, 1, 76. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.15>
- [39]. **Perrot, A., Mélinge, Y., Rangeard, D., Micaelli, F., Estellé, P., & Lanos, C. (2012)**. Use of ram extruder as a combined rheo-tribometer to study the behaviour of high yield stress fluids at low strain rate. *Rheologica Acta*, 51, 743-754. <https://doi.org/10.1007/s00397-012-0638-6>
- [40]. **Zhou, X., Li, Z., Fan, M., & Chen, H. (2013)** Rheology of semi-solid fresh cement pastes and mortars in orifice extrusion. *Cement and Concrete Composites*, 37, 304-311. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.004>
- [41]. **Perrot, A., Rangeard, D., Amziane, S., & Sonebi, M. (2019)**. Défis à relever en termes de rhéologie des matériaux cimentaires pour une impression 3D par extrusion/dépôt. *Academic Journal of Civil Engineering*, 36(1), 175-179. <https://doi.org/10.26168/ajce.36.1.43>
- [42]. **Charrier, M. (2019)**. Étude et prédiction des propriétés de matériaux cimentaires à l’état frais pour la fabrication additive à l’aide de réseaux de neurones (Mémoire). Consulté à l’adresse https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2374/1/CHARRIER_Malo.pdf.
- [43]. **Grellier, A., Zhao, Z., Remond, S., Courard, L., & Bulteel, D. (2018)** Caractérisation de briques pour l’élaboration de liants hydrauliques. Consulté à l’adresse <https://pdfs.semanticscholar.org/29a3/e92f007602be3528ed948b5b2543d67a34d8.pdf>
- [44]. **Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012)** . Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*, 45(8), 1221-1232. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
- [45]. **Kazemian, A., Yuan, X., Cochran, E., & Khoshnevis, B. (2017)** Cementitious materials for construction-scale 3D printing : Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials*, 145, 639-647. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015>
- [46]. **Weng, Y., Li, M., Tan, M., & Qian, S. (2018)** Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marston-Percy model. *Construction and Building Materials*, 163, 600-610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.112>
- [47]. **Panda, B. and Tan, M. J. (2018)** Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing’, *Ceramics International*, 44(9), pp. 10258–10265.
- [48]. **Noura khalil (2018)** Formulation et caractérisation chimique et rhéologique des mortiers imprimables en 3D à base de mélanges de ciments portland et sulfoalumineux,
DOCTORAT DE L’UNIVERSITE DE LILLE DELIVRE PAR IMT LILLE DOUAI.
- [49]. **Saelen Lucas (2020)** Composition des bétons imprimés en 3D - Substitution de composants issus des matières premières par des fines de briques, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées.

- [50]. **Le, T.T., Austin, S.A., Lim, S., Buswell, R.A., GibbT., A.G. F. and Thorpe, T. (2012)** , Hardened properties of high-performance printing concrete', *Cement and Concrete Research*, 42(3), pp. 558–566.
- [51]. **Lootens, D., Jousset, P., Martinie, L., Roussel, N. and Flatt, R.J. (2009)** , Yield stress during setting of cement pastes from penetration tests', *Cement and Concrete Research*, 39(5), pp. 401– 408.
- [52]. **Grellier, A. (2020)**. Données des briques références [Diapositives].
- [53]. **SNL. (2020)**. Sable CEN EN 196-1. Consulté à l'adresse <https://www.standard-sand.com/sables-cen-en-196-1/>
- [54]. **Roussel, N., & Coussot, P. (2005)**. Fifty-cent rheometer" for yield stress measurements: From slump to spreading flow. *Journal of Rheology*, 49(3), 705-718. <https://doi.org/10.1122/1.1879041>

Annexe A – Fiche technique du CSA

FTSE14.provisoire Mise à jour : 25/11/2016 Page 1/1	Produit : Ciment sulfoalumineux bélitique Usine : Saint Egrève (38)
---	--

Caractéristiques physiques et mécaniques

	Masse Volumique (g/cm ³)	Finesse Blaine (cm ² /g)	Clarté L*	Demande en eau (%)	Temps de début de prise (min)	Expansion (mm)	Chaleur d'hydratation à 41 heures (J/g)	Retrait sur mortier (µm/m) 28 jours	Résistance en compression (MPa)				
									8 h	1 j	2 j	7 j	28 j
Méthode	EN 196-6	EN 196-6	CIE 1976	EN 196-3	EN 196-3	EN 196-3	EN 196-9	NF P 15-433	EN 196-1				
Moyenne	2,97	4500	55.1	26	42	0	288	340	21	31	32	39	43
Ecart-type	0.01	210	*	0,5	8	*	12	60	3,0	1,5	1,7	2,4	2,6
Limites CE	2,8 – 3,2	4050 - 5050	*	*	≤ 120	≤ 10	*	≤ 750	≥ 8				≥ 30

Caractéristiques chimiques EN 196-2

(%)	Moyenne	Ecart-type	Limites CE
Alcalins eq. totaux	0,16	0,02	*
Perte au feu 950°C	3,8	0,3	*
SiO ₂	8,16	0,27	*
Al ₂ O ₃	18,22	0,55	*
Fe ₂ O ₃	7,64	0,20	*
CaO	43,60	0,30	*
SO ₃	15,24	0,46	10 - 20
Cl ⁻	0,05	0,03	≤ 0,10

Composition du ciment et caractéristiques du clinker par Diffraction X

Constituant	Teneur (%)	Caractéristiques minéralogiques du clinker par Diffraction X (%)					
		C4A3\$	C ₂ S	C ₁ MS ₂	C ₂ FT	C\$	Chaux libre
Clinker	77	54,3	29,1	4,5	9,3	0,4	0,2
Anhydrite	18	*	*	*	*	*	*
Filler calcaire	5	*	*	*	*	*	*

Certification CE

En cours (Evaluation Technique Européenne)

Annexe B – Fiche technique du CEM I

FTSE2.1730 Mise à jour : 31/01/2017 Page 1/1	Produit : CEM I 52,5 N SR3 CE PM-CP2 NF Usine : Saint Egrève (38)
--	--

Caractéristiques physiques et mécaniques

	Masse Volumique (g/cm ³)	Finesse Blaine (cm ² /g) / Diamètre médian (µm)	Clarté L*	Demande en eau (%)	Temps de début de prise (min)	Expansion (mm)	Chaleur d'hydratation à 41h (J/g)	Résistance en compression (MPa)			
								1j	2j	7j	28j
Moyenne	3,19	3940/ 12,5	59,0	26,5	168	1,0	290	18	30	47	62
Ecart type	*	150/ 0,7	*	0,4	21	0,6	15	1,7	1,9	2,4	2,0
Limites	CE	*	*	*	≥ 40	≤ 10	*	*	≥ 18	*	≥ 50
	NF	*	*	*	≥ 60	≤ 5	*	*	≥ 18	*	≥ 50

Caractéristiques chimiques

(%)	Moyenne	Ecart type	Limites	
			CE	NF
Alcalins eq. actifs (Na ₂ O eq. actifs)	0,46	0,04	*	*
Perte au feu 950°C	1,20	*	≤ 5,0	≤ 3,0
MgO	0,91	*	*	≤ 3,0
Al ₂ O ₃	3,65	*	*	≤ 8,0
SO ₃	2,24	*	≤ 4,0	≤ 3,0
Cl ⁻	0,06	*	≤ 0,10	≤ 0,10
S ²⁻	0,00	*	*	≤ 0,2
Résidu insoluble	0,45	*	≤ 5,0	≤ 0,75
C ₃ A	1,14	*	≤ 4	≤ 3
C ₃ A+0,27xC ₃ S	17,9	*		≤ 23,5
C ₄ AF+ 2xC ₃ A	17,6	*	*	≤ 20

Composition hors gypse et caractéristiques des constituants

Constituant	Teneur (%)	Caractéristiques (%)			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Clinker	99	62,6	16,5	1,5	13,1
Calcaire	*	*	*	*	*
Laitier	*	*	*	*	*
Constituants Secondaires	1	*	*	*	*

Certificat CE et Marque NF-LH

Certificat CE	N° 0333-CPR-1002
Marque NF-Liant Hydraulique	N°10.59 du 15.06.2016

Annexe C – Fiche technique du superplastifiant

SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 11

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2.



Présentation	SIKA VISCOCRETE TEMPO 11 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.
Domaines d'application	<ul style="list-style-type: none">■ SIKA VISCOCRETE TEMPO 11 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants sur une large gamme de résistance mécanique (du C20 au C60) et transportés sur de longues distances et pompés.■ SIKA VISCOCRETE TEMPO 11 rend les formules plus robustes aux variations d'eau et ne présente aucun pétélement sur béton frais.
Caractères généraux	SIKA VISCOCRETE TEMPO 11 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes : <ul style="list-style-type: none">■ longue rhéologie (>2h),■ robustesse aux variations d'eau,■ qualité de parement.
Caractéristiques	
Aspect	Liquide brun clair
Conditionnement	<ul style="list-style-type: none">■ Fûts de 230 kg■ CP de 1000 L■ Vrac
Stockage	A l'abri du gel. En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une fois dégelé lentement et réhomogénéisé.
Conservation	12 mois dans son emballage d'origine intact
Données techniques	
densité	1,060 ± 0,020

Annexe D – Fiche technique Ciment CEM I 52,5 N

Ce ciment est produit dans nos usines de Rochefort (39) et Montoir de Bretagne (44).

Définition

Le ciment CEM I 52,5 N CE PM CP2 NF est composé de :

- 95 % à 100 % de clinker
- 0 % à 5 % de constituants secondaires

La présence d'une faible quantité de sulfate de calcium assure la régularité de la prise.

Domaines d'utilisation

Le ciment CEM I 52,5 N CE PM CP2 NF est destiné aux bétons d'ouvrages soumis à un environnement faiblement ou moyennement agressif (eau de mer, faible teneur en sulfates, se référer aux normes en vigueur...)

Ce ciment est adapté aux :

- Béton de classe de résistance > C35/40 MPa
- Béton préfabriqué
- Béton armé ou précontraint (par pré ou post-tension)
- Béton en élévation
- Dallage

Caractéristiques physiques et mécaniques garanties

- Début de prise à 20 °C mesuré sur pâte pure \geq 40 min
- Stabilité mesurée sur pâte pure \leq 5 mm selon la norme NF EN 196-3
- Résistances mécaniques à la compression déterminées sur mortier normalisé, conformément à la norme NF EN 196-1

Résistance à la compression sur mortier en MPa (valeurs limites inférieures)	
Résistance à court terme	Résistance courante
2 J	28 J
18,0	50,0

Caractéristiques chimiques garanties

- Teneur en $SO_3 \leq 3,0$ % si $C3A \leq 8$ %
- Teneur en $SO_3 \leq 2,5$ % si 8 % < $C3A \leq 10$ %
- Teneur en $Al_2O_3 \leq 8,0$ %
- Teneur en $MgO \leq 3,0$ %
- Teneur en $Cl^- \leq 0,10$ %
- Teneur en $C3A + 0,27 C3S \leq 23,5$ %
- Teneur en $C3A \leq 10$ %
- Teneur en $S^{2-} \leq 0,2$ %

Emplois particuliers

Caractéristiques complémentaires nécessaires	
Environnements moyennement agressifs et travaux à la mer	PM (norme NF P 15-317) marque NF
Bétons précontraints par pré ou post-tension	CP (norme NF P 15-318) marque NF

PM : Prise Mer

CP2 : Ciments à teneur en sulfates limitée pour béton précontraint $S^{2-} < 0,2$ %

Précautions d'emploi

Les bétons de grande masse nécessitent une évaluation de la chaleur atteinte dans le béton selon les recommandations pour la prévention des désordres dus à la Réaction Sulfatique Interne (RSI).

Ce ciment ne convient pas pour :

- Les travaux routiers
- Les enduits
- La pose de carrelage
- Les travaux en milieux fortement agressifs

Recommandations spécifiques et générales

- Utiliser des granulats propres, exempts de matières organiques
- Respecter les dosages et les règles de l'art pour la mise en œuvre
- Viser un rapport Eau / Ciment de préférence le plus faible possible, compatible avec la mise en œuvre du béton frais
- Utiliser des adjuvants normalisés et vérifier leur compatibilité avec ce ciment
- Eviter une dessiccation précoce par temps chaud ou venteux en réalisant une cure du béton (eau pulvérisée, bâche humide, produits de cure...)
- Adapter la vibration du béton à sa consistance pour obtenir une compacité optimale sans ségrégation
- Eviter tout contact avec la peau et les yeux
- Utiliser des équipements adaptés : gants, chaussures imperméables, lunettes...

EQIOM ne peut être tenu responsable d'une mauvaise application ou interprétation des informations contenues dans le présent document. En cas de question ne pas hésiter à nous consulter.

juillet 2018

EQIOM

49, avenue Georges Pompidou
92593 Levallois-Perret Cedex

www.eqiom.com

Direction des ventes Nord

T 01 41 06 11 38
Direction des ventes Atlantique
T 02 51 73 78 70
Direction des ventes Est
T 03 90 29 55 40

Annexe E – Fiche Superplastifiant Ultibat (anciennement DeltaPro)



Déclaration des Performances N°DE 029 V1

- 1 Code d'identification unique du produit type :**
Superplastifiant DELTAPRO 1156468
- 2 Numéro de type, de lot, ou de série ou tout autre élément permettant l'identification du produit de construction :**
Voir emballage : date de fabrication, numéro de lot
- 3 Usage ou usages prévus du produit de construction, conformément à la spécification technique harmonisée applicable :**
Adjuvants qui, sans modifier la consistance, permet de réduire la teneur en eau d'un béton donné, sans modifier la teneur en eau, en augmente l'affaissement/l'étalement, ou qui produit les deux effets à la fois selon EN 934 – 1 : 2008 et EN 934 – 2 : 2009 + A1 : 2012
- 4 Nom, raison sociale ou marque déposée et adresse de contact du fabricant :**
GIE IBANA,
13-15 rue Germaine Tailleferre,
75019, Paris,
France.
- 5 Le cas échéant, nom et adresse de contact du mandataire :**
Non applicable
- 6 Système d'évaluation et de vérification de la constance des performances du produit de construction :**
Système 2+
- 7 Déclaration des performances concernant un produit de construction couvert par une norme harmonisée :** EN 934-1 : 2008 et EN 934-2 : 2009 + A1 : 2012
Le CERID a délivré une attestation de conformité CE de contrôle de production en usine n° 1164 – CPD – ADJ016
- 8 Déclaration des performances concernant un produit de construction pour lequel une évaluation technique européenne a été délivrée :**
Non applicable
- 9 Performances déclarées :**

Caractéristiques essentielles	Performances	Spécification technique harmonisée
Teneurs en ions chlorure	$\leq 0,10\%$ en masse	EN 934 – 1 : 2008
Teneur en alcalins	$\leq 3,20\%$ en masse	
Effet sur la corrosion	Contient les composants uniquement de l'EN 934 – 1 : 2008 Annexe A.1	
Caractéristiques essentielles	Performances	Spécification technique harmonisée
Résistance à la compression (béton type I)	BA $\geq 140\%$ du BT à 1 jour BA $\geq 115\%$ du BT à 28 jours	
Résistance à la compression (béton type IV)	BA $\geq 90\%$ du BT à 28 jours	
Teneur en air du béton frais	$\leq 2\%$ en volume au dosage de celle du BT	

Teneur en air (air entraîné)	Non requis	EN 934 – 2 : 2009 + A1 : 2012
Caractéristique des vides d'air	Non requis	
Réduction d'eau	BA \geq 12 % par rapport au BT	
Ressuage	Non requis	
Temps de prise	Performance non déterminée	
Temps de durcissement/ Développement de la résistance	Performance non déterminée	
Absorption capillaire	Non requis	
Consistance :		
Augmentation de la consistance	\geq 120 mm par rapport aux (30 \pm 10) mm initiaux	
Maintien de la consistance	Affaissement BA \geq BT 30 min après l'ajout	
Substances dangereuses	Voir FDS	
Durabilité	Performance non déterminée	

10 Les performances du produit identifié aux points 1 et 2 sont conformes aux performances déclarées indiquées au point 9.

La présente déclaration des performances est établie sous la seule responsabilité du fabricant identifié au point 4.

Signé pour le fabricant et en son nom par :

JC Mével,
Responsable Réglementations

Le : 23/04/16 à : Paris

