

17^e édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

IFSTTAR, Marne-la-Vallée, France
7 et 8 juillet 2016

IMPRESSION 3D DES MATERIAUX CIMENTAIRES: DE LA FORMULATION A LA MISE EN OEUVRE

N. Khalil^{A,B}, G. Aouad^{A,B}, K. El Cheikh^{A,B}, S. Rémond^{A,B}

A Mines Douai, LGCgE – GCE, F-59508 Douai, France

B Université de Lille, F-59000 Lille, France

RÉSUMÉ : L'impression 3D s'est développée très rapidement pour la fabrication de pièces métalliques ou en matières plastiques. Elle fait maintenant l'objet d'un intérêt croissant dans le domaine de la construction. Toutefois, jusqu'à maintenant, il n'existe pas de norme ni même de cahier des charges permettant de qualifier les matériaux cimentaires imprimables. De même, il existe très peu de travaux dans la littérature concernant ces matériaux. L'objectif de cet article est de présenter la démarche expérimentale et numérique mise en œuvre à l'École de Mines de Douai pour la formulation d'un matériau cimentaire imprimable et de montrer les premiers résultats obtenus.

1. INTRODUCTION

L'impression 3D est un procédé de construction additive défini par l'ASTM (ASTM, 2013) comme étant «un processus consistant à assembler un matériau pour réaliser des objets 3D à partir d'un modèle numérique, généralement couches par couches». La construction additive permet de produire des objets de formes complexes en une unique étape et par la suite permet de réduire le besoin d'assemblages. De même, ce procédé rend la production plus flexible et moins coûteuse en éliminant l'utilisation des outils et des moules (Weller et al., 2015).

A l'heure actuelle, cette méthode de fabrication fait l'objet de nombreuses attentes, pourtant elle n'est pas encore assez mature pour satisfaire ces dernières (Weller et al., 2015). Cependant, la technologie de l'impression 3D se développe rapidement. Elle est d'ores et déjà utilisée dans différents domaines industriels comme la mise en œuvre de matières plastiques et de métaux. Plusieurs applications ont également été développées dans le domaine de la construction, notamment en Chine. En revanche, il existe très peu de publications scientifiques concernant l'impression 3D des matériaux cimentaires. De même, l'absence des normes qui permettent de caractériser le matériau imprimé rend sa formulation et l'étude de ses propriétés difficiles. Pour être considéré comme "imprimable" un mortier doit satisfaire à un cahier des charges très exigeant. Il doit tout d'abord être "extrudable", c'est-à-dire qu'il doit pouvoir être pompé dans des tuyaux et à travers une buse d'impression sans subir de filtration, ressuage, ségrégation ni de blocages. De même, le mortier doit être "buildable", c'est-à-dire que chaque couche de matériau imprimé doit pouvoir supporter le poids des couches supérieures sans s'affaisser ni se déformer de

manière excessive. Enfin, après juxtaposition des couches, le mortier doit développer des résistances mécaniques suffisantes vis-à-vis de l'application envisagée.

Pour satisfaire à ce cahier des charges particulier, la cinétique de prise et de durcissement du mortier et son comportement rhéologique doivent être contrôlés avec précision. En effet, le mortier doit être suffisamment fluide pour être considéré comme extrudable mais il doit également durcir suffisamment rapidement à la sortie de la buse d'impression afin de pouvoir supporter le poids des couches supérieures. De plus, la géométrie de la buse d'impression, notamment son diamètre d'ouverture peut jouer un rôle primordial sur l'extrudabilité du matériau; la formulation de ce dernier dépend donc étroitement du matériel utilisé pour l'impression.

Ce travail comporte deux approches : une expérimentale et une numérique. Le travail expérimental porte sur le choix d'un liant permettant d'augmenter la réactivité du ciment Portland et par la suite de formuler un mortier imprimable. Ce liant est développé à partir d'un mélange de ciment Portland et d'un second liant (confidentiel). De même le mortier imprimable doit posséder une résistance à la compression qui réponde aux exigences de son application. Pour la partie numérique, un code interne basé sur la méthode aux éléments discrets (DEM) (Cundall et al., 1979) est utilisé. L'approche numérique permet d'étudier l'influence de plusieurs paramètres de formulation et de la géométrie de la buse d'injection sur l'extrudabilité et la buildabilité du mortier.

Nous présentons dans la section 2 la méthodologie expérimentale utilisée pour simuler au laboratoire l'impression 3D du mortier. Ensuite, le modèle utilisé est décrit dans la section 3. Les matériaux et les formulations du mortier utilisés sont présentés dans la section 4. Les résultats obtenus par l'approche expérimentale et numérique sont présentés dans la section 5. Enfin, le travail réalisé et les principaux résultats obtenus sont rappelés dans la conclusion.

2. METHODOLOGIE

L'impression 3D du mortier s'effectue manuellement. Le matériel utilisé est constitué d'un pistolet qui présente à son extrémité une buse conique [Fig.1]. Le diamètre d'ouverture de la buse est de 1 cm.



Figure1: Matériel (pistolet et buse) utilisé pour l'impression manuelle du mortier.

Comme décrit précédemment, un mortier est considéré comme imprimable lorsqu'il est à la fois extrudable et buildable. Le terme extrudable signifie tout d'abord que le mortier doit sortir à travers la buse par application d'une pression en tête du pistolet et non sous l'effet de son poids propre. De plus, le mortier doit sortir sans subir ni filtration, ressuage ou ségrégation qui peuvent conduire à la formation de « bouchons » et par la suite au blocage de la buse. Le terme buildable signifie que plusieurs couches de mortier peuvent être superposées sans subir de déformations excessives. Dans ce travail, nous considérons le mortier comme buildable lorsqu'il est possible de superposer, sans temps d'attente, quatre couches de mortier.

3. MODELISATION DE L'IMPRESSION 3D du mortier

Dans cette étude, la méthode aux éléments discrets (DEM) (Cundall et al., 1979) est choisie pour modéliser l'impression 3D du mortier. Le code numérique utilisé est un code-interne développé au département Génie Civil et Environnemental à l'Ecole des Mines de Douai (Rémond et al., 2014).

3.1 Forces d'interaction : Modèle Hard-core soft-shell

Le mortier est modélisé par un assemblage de particules sphériques, composés de grains solides, représentant le sable, de diamètre d entourés par une couche sphérique, représentant la pâte de ciment, d'épaisseur Wm (Figure 2). La loi de Newton décrit les mouvements de translation et de rotation des particules sous l'action des forces agissant sur elles. Les forces exercées sur chaque particule sont calculées à partir de lois de contact qui dépendent du type d'interaction. Dans notre modèle numérique, deux types d'interactions existent : des interactions fluide-fluide et des interactions solide-solide. Les interactions entre les couches sphériques sont de type fluide-fluide et dépendent des caractéristiques rhéologiques de la pâte de ciment. Les contacts entre les grains solides dépendent des caractéristiques micromécaniques des matériaux solides (module d'Young, coefficient de Poisson, etc). Lorsque le mortier est homogène, les interactions entre les particules sont principalement gouvernées par les forces de contact fluide-fluide. En effet, un large chevauchement entre deux couches sphériques est autorisé. En revanche, le chevauchement entre les grains solides est très limité et dépend de la valeur du module d'Young utilisé pour le calcul.

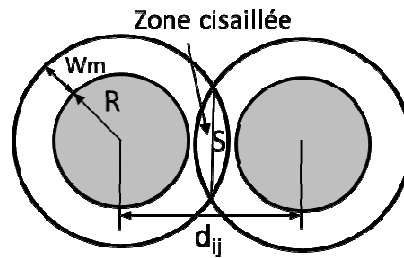


Figure 2 : Représentation schématique des deux couches sphériques en interaction.

Les forces de contact entre les grains solides et les interactions fluide – fluide sont décrites en détail dans (Rémond et al, 2014). Ce modèle de forces a déjà été utilisé pour étudier l'écoulement d'un béton fluide. La force de contact $F_{hc,ij}$ entre deux grains solides i et j se calcule sur la base du chevauchement des grains en contact et des paramètres micromécaniques. Cette force se décompose en une composante normale $F_{hc,ij}^n$ et une composante tangentielle $F_{hc,ij}^t$. L'interaction $F_{ss,ij}$ entre deux couches de fluide entourant les grains solides i et j est composée d'une composante normale $F_{ss,ij}^n$ et d'une composante tangentielle $F_{ss,ij}^t$. Afin de modéliser un mortier imprimable (plus ferme), une composante attractive a été ajoutée à la force normale $F_{ss,ij}^n$. Par conséquent, la composante normale peut être répulsive [Eq.1], attractive [Eq.2] ou nulle [Eq.3]. Le facteur qui détermine le signe de la force normale est la distance séparant les deux grains solides. La composante normale répulsive est activée lorsque la distance séparant les deux grains solides est inférieure à une distance $h_{min} = Wm/2$ [Eq.1]. En revanche, la composante normale attractive est activée lorsque la distance séparant les deux grains solides est supérieure à h_{min} et inférieure à $2h_{min}$ [Eq.2].

$$\text{Si } (d_{ij} - 2R) \leq h_{min} \quad F_{ss,ij}^n = k_{ss}^n (2R + h_{min} - d_{ij}) \cdot n_{ij} \quad \text{Eq.1}$$

$$\text{Si } h_{min} < (d_{ij} - 2R) \leq 2h_{min} \quad F_{ss,ij}^n = \frac{k_{ss}^n}{500} (2R + h_{min} - d_{ij}) \cdot n_{ij} \quad \text{Eq.2}$$

$$\text{Si } 2h_{min} < (d_{ij} - 2R) \quad F_{ss,ij}^n = 0 \quad \text{Eq.3}$$

La composante tangentielle $F_{ss,ij}^t$ est déduite de la contrainte de cisaillement τ agissant sur la surface d'intersection des deux couches fluides. En effet, en considérant la pâte de ciment comme un fluide de Bingham, la contrainte de cisaillement τ calculée sur une surface d'intersection circulaire S (Figure 2) peut être exprimée en fonction des caractéristiques rhéologiques de la pâte de ciment et du gradient de vitesse [Eq.4]. La composante tangentielle $F_{ss,ij}^t$ est ensuite calculée selon l'équation Eq.5.

$$\tau = \tau_0 + \mu_0 \dot{\gamma} \quad \text{Eq.4}$$

$$F_{ss,ij}^t = S * \tau \quad \text{Eq.5}$$

τ_0 et μ_0 sont les caractéristiques rhéologiques de la pâte de ciment entourant le grain solide respectivement le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. $\dot{\gamma}$ est le gradient de vitesse qui dépend de la vitesse relative entre les deux particules en contact et de la distance séparant les deux grains solides.

3.2 Etapes de la simulation

Expérimentalement, la géométrie utilisée pour l'impression 3D comporte un tube qui présente à son extrémité une buse conique. Le tube est modélisé via les conditions aux limites par un cylindre de diamètre $10d$. En revanche, la buse est modélisée par des anneaux formés par des sphères de diamètre d (Figure 3). Le diamètre de l'ouverture inférieure de la buse est $6d$, sauf mention contraire.

La préparation du matériau consiste dans un premier temps à générer aléatoirement un gaz de particules dans le volume de calcul (le tube et la buse). Ensuite, l'ensemble de grains est lâché sans vitesse initiale et sédimente sous l'effet de la gravité pour atteindre un état d'équilibre (Figure 3-a). A noter que durant la préparation de l'empilement et afin d'empêcher l'écoulement du matériau à travers l'ouverture inférieure de la buse, cette dernière est fermée par un plan horizontal.

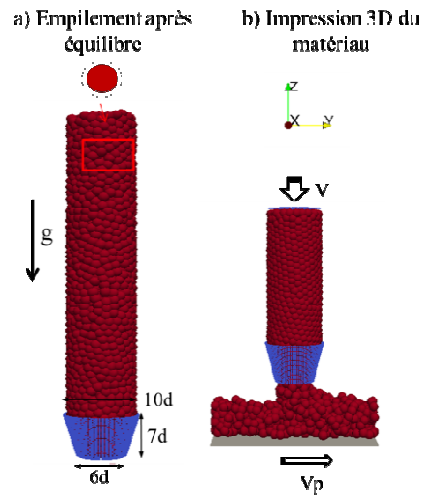


Figure 3 : Etapes de la simulation : (a) préparation du matériau et (b) impression 3D.

Afin d'imprimer le matériau, une pression normale est appliquée par un plateau placé sur la surface supérieure de l'empilement (Figure 3-b). Le plateau se déplace verticalement à vitesse constante V de 20 d/s. Lors du déplacement du plateau supérieur, le matériau sort de la buse et se dépose sur un plan inférieur qui se déplace à une vitesse constante V_p de 50 d/s. La distance entre la buse et le plan inférieur est $10d$. Cette distance est fixée de manière à pouvoir imprimer deux couches d'épaisseur d'environ $4d$. Les principaux paramètres utilisés pour la simulation sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Paramètres utilisés pour la simulation.

Paramètres concernant les grains solides (Symbole)	Valeur (Unité)
Diamètre des grains solides (d)	1 mm
Nombre des grains (n)	1500 - 3000 (-)
Densité des grains solides (ρ)	2500 kg /m ³
Module d'Young (E)	1,0 E +7 Pa
Coefficient de Poisson (ν)	0,3 (-)
Coefficient de frottement (μ)	0,3 (-)
Coefficient de roulement (μ_r)	0,002 (-)
Constante d'amortissement (γ_n)	4,5 E-5 S ⁻¹

Paramètres concernant le fluide (Symbole)	
Densité du fluide (ρ_f)	900 kg/m ³
Viscosité plastique (μ_0)	0,1 Pa.s
Seuil de cisaillement (τ_0)	0,1 ; 1 ; 10 ; 20 ; 30 Pa
Epaisseur de la couche (Wm)	0,4 mm
k_{ss}^n	100 (-)

4. MORTIERS : MATÉRIAUX ET FORMULATIONS

Le mortier utilisé est composé des matériaux suivants : sable normalisé (CEN, EN 196-1), eau déminéralisée, super-plastifiant Sika tempo 11 (SP), liant (OPC Durabat® X-trem – Lafarge) et/ou (additif minéral confidentiel). Plusieurs mélanges OPC/additif et plusieurs formulations de mortiers ont été réalisés pour trouver un mortier imprimable noté par la suite M3. Deux autres formulations M1 et M2 sont réalisées à partir de ce mortier M3, en remplaçant le mélange OPC/additif par le ciment OPC seul (mortier M1) ou par l'additif seul (mortier M2).

Pour chaque formulation, deux types d'essais sont réalisés: un essai sur la pâte de ciment (mesure de la chaleur d'hydratation) et un essai sur le mortier (mesure de la résistance à la compression et à la flexion). La chaleur d'hydratation des pâtes de ciment est mesurée par un calorimètre isotherme. Les mesures sont réalisées sur des échantillons composés de ciment et d'eau (E/C = 0,5) stockés initialement à 20 °C. L'échantillon de pâte de ciment est ensuite malaxé manuellement pendant quelques secondes puis placé dans la cellule du calorimètre. La température à l'intérieur de la cellule est 20 °C.

Afin d'obtenir un mortier imprimable, nous avons suivi une procédure de malaxage spécifique pour une durée totale de 5 minutes. Ensuite, le mortier est placé dans des moules prismatiques 4mmx4mmx16mm. Pour les formulations M1, M2 et M3 le remplissage des moules s'est effectué suivant la norme française NF EN 196-1. En revanche, afin d'étudier les résistances mécaniques d'un matériau imprimé, une deuxième méthode de remplissage des moules a été suivie pour la formulation M3. Cette méthode consiste à remplir les moules par trois couches de mortier juxtaposées en utilisant le pistolet d'impression. La largeur des couches est égale à celle du moule (4 cm). Par la suite, le mortier M3 mis en place selon la norme NF EN 196-1 sera nommé M3S, alors que le mortier mis en place au pistolet par superposition des couches sera nommé M3P. Les résistances à la flexion et à la compression sont mesurées pour chaque mortier à 2, 7 et 28 jours. Chaque valeur de la résistance à la compression et à la flexion est respectivement la moyenne de trois et six mesures. Seuls les résultats obtenus sur la mesure de la résistance à la compression sont présentés dans la suite.

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1 Influence du type de liant sur l'extrudabilité, la buildabilité et la résistance à la compression du mortier

Les essais réalisés sur les mortiers M1 et M2 montrent que ces deux mortiers sont non imprimables. En effet, le mortier M1 est « non buildable » ; suite à la juxtaposition des couches, les couches inférieures s'affaissent et subissent des déformations importantes. Le mortier M2 est « non extrudable ». En effet, durant le malaxage le mélange durcit rapidement ce qui conduit à la formation de bouchons et empêche la sortie du matériau de la buse. En revanche, le mortier M3 est à la fois extrudable et buildable, il est donc imprimable. Durant le processus d'impression, le mortier sort de la buse sans problèmes de blocages ou de filtration. De plus, les premières couches imprimées supportent le poids des couches supérieures sans subir une déformation importante. Avec le mortier M3, une juxtaposition de 50 couches a été réalisée. A partir de ce mortier, il a été possible de réaliser avec le dispositif manuel d'impression des pièces ayant des surfaces inclinées sans utilisation de support (Figure 4).



Figure 4: Impression des surfaces inclinées.

5.1.1 Mesure de la chaleur d'hydratation

La mesure du flux de chaleur d'hydratation permet d'étudier l'intensité des réactions chimiques des ciments utilisés. La figure 5 présente l'évolution de la chaleur d'hydratation sur une durée de 48 heures. Les indices M1, M2 et M3 se réfèrent aux pâtes de ciment formulées à partir des ciments utilisés respectivement pour les mortiers M1, M2 et M3.

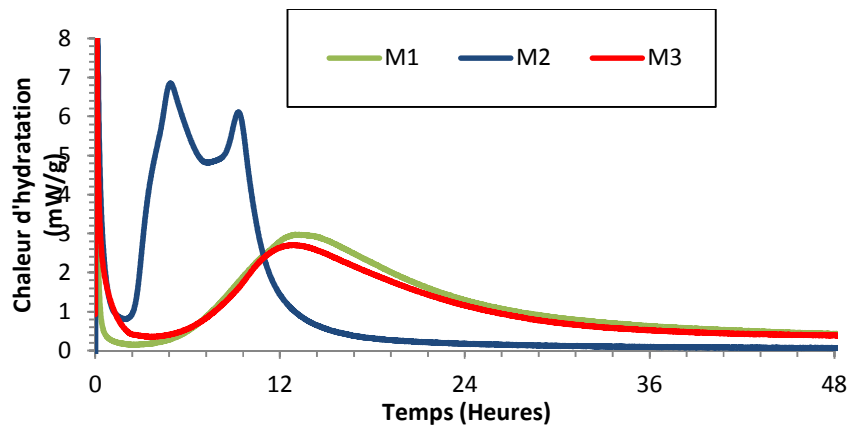


Figure 5: Evolution de la chaleur d'hydratation pour différentes pâtes de ciment formulées reflétant l'impact de l'additif sur le ciment Portland.

On remarque que la courbe M1 (pâte de ciment Portland avec superplastifiant) présente un premier pic de chaleur qui débute dès le gâchage et qui ne dure que quelques minutes. Ce premier pic est suivi par la période dormante pendant laquelle le matériau n'évolue pas et le dégagement de chaleur est très faible. La période d'accélération démarre à environ 4 heures et ce qui conduit à l'apparition du deuxième pic qui se termine par une période de ralentissement.

La courbe M2 (additif avec superplastifiant) présente aussi un premier pic qui débute au gâchage qui dure plus longtemps que M1. On note l'absence d'une période dormante pour le liant M2 parce que le pic d'accélération à environ 2 heures apparait avant le retour de la courbe à la ligne de base, ce qui explique pourquoi le liant M2 n'est pas extrudable. Par opposition, le matériau M1 présente un retour très rapide à la ligne de base et une assez longue période dormante ce qui le rend non buildable.

La courbe M3 (liant extrudable et buildable) présente une allure équivalente à celle du ciment Portland (M1) avec un premier pic au gâchage puis une période dormante qui se termine par un pic d'accélération

à environ 4 heures. La figure 6 montre le flux de chaleur à très court terme pendant lequel les caractéristiques de d'extrudabilité et de buildabilité sont obtenues. On remarque que le liant M3 présente un premier pic plus large que M1 ce qui lui procure la buildabilité mais moins large que celui de M2 ce qui lui permet de garder le caractère extrudable. On note aussi que contrairement au liant M2, le liant M3 présente une période dormante.

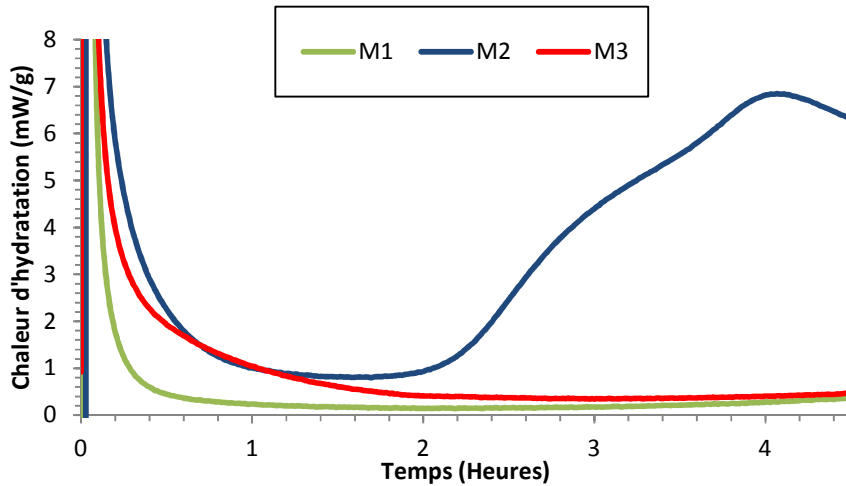


Figure 6: Evolution de la chaleur d'hydratation pour différentes pâtes de ciment formulées reflétant l'impact de l'additif sur le ciment Portland ordinaire.

5.1.2 Mesure de la résistance à la compression

La figure 7 présente l'évolution de la résistance à la compression. Nous rappelons que pour M1 et M3S les mortiers de formulations M1 et M3 sont placés dans les moules en respectant la norme française NF EN 196-1. En revanche, pour M3P, le mortier M3 est placé dans les moules par couches juxtaposées.

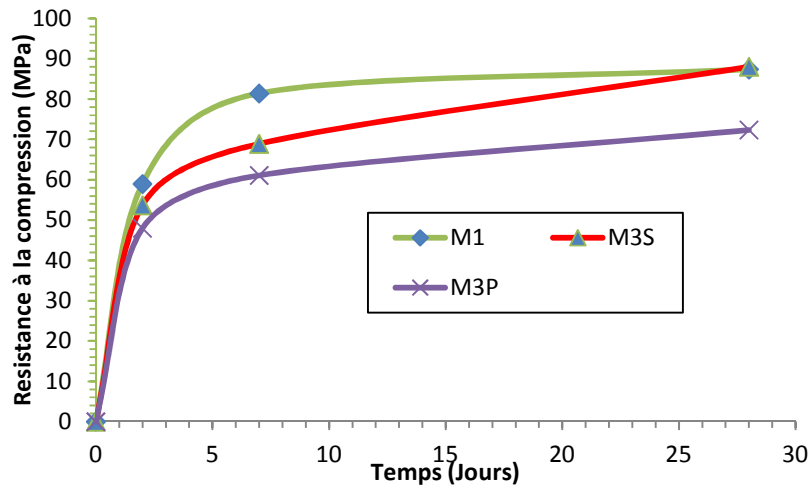


Figure 7 : Résistance à la compression à 2, 7 et 28 jours pour les mortiers M1, M3S et M3P.

1 - La comparaison entre les courbes M1 et M3S permet d'étudier l'effet de l'additif sur la résistance à la compression. Pour formuler le mortier M3, un additif est ajouté au mortier M1 pour accélérer son hydratation et le rendre imprimable. Cette accélération à très court terme peut avoir une influence sur ses performances mécaniques. L'enjeu est de développer un matériau imprimable sans que les performances mécaniques à long terme ne soient affectées. La figure 7 montre une baisse de la résistance à la compression de 9% à 2 jours et de 18% à 7 jours pour M3S en comparaison avec M1. En revanche, à 28 jours le mortier M3 développe des performances mécaniques équivalentes au témoin M1. Ce résultat montre que la baisse des résistances mécaniques à 2 et 7 jours pour rendre le mortier M3 imprimable a complètement été rattrapée à 28 jours.

2 - La comparaison entre les courbes M3S et M3P permet d'étudier l'effet de la méthode de remplissage des moules sur la résistance à la compression. Une baisse de la résistance à la compression est notée pour les moules remplis par couches (impression 3D) par rapport aux moules remplis en respectant la norme NF EN 196-1. Une résistance plus importante pour M3S peut être expliquée par le fait d'appliquer des chocs aux moules pendant la mise en œuvre. Ces chocs rendent le matériau homogène et réduisent la porosité. Malgré tout, la résistance obtenue à 28 jours pour le mortier M3P reste élevée.

5.2 Influence des propriétés rhéologiques du mortier modélisé sur sa buildabilité

L'approche numérique est utilisée pour étudier les aspects rhéologiques et le blocage du matériau. Nous discutons tout d'abord l'influence du seuil de cisaillement de la pâte de ciment sur la buildabilité du matériau. Ensuite, nous présentons l'influence du diamètre d'ouverture de la buse sur l'extrudabilité.

L'originalité du modèle numérique utilisé est qu'il permet d'étudier l'influence des paramètres rhéologiques de la pâte de ciment sur le comportement macroscopique du matériau modélisé. Comme mentionné dans la section 3.1, les interactions entre les couches sphériques de type fluide-fluide dépendent des caractéristiques rhéologiques (loi de comportement du fluide de Bingham). La figure 8 présente l'influence du seuil de cisaillement microscopique (τ_0) sur la buildabilité du mortier modélisé. Les résultats montrent que pour un seuil de cisaillement faible de la pâte de ciment (0,1 Pa), le matériau extrudé est non buildable. En effet, le matériau modélisé se comporte comme un mortier fluide. En d'autres termes, la première couche subit un affaissement sous le poids de la seconde. En revanche, pour un seuil de cisaillement de la pâte de ciment de 10 Pa le mortier modélisé est considéré comme buildable. La première couche supporte le poids de la couche juxtaposée sans subir un affaissement important.

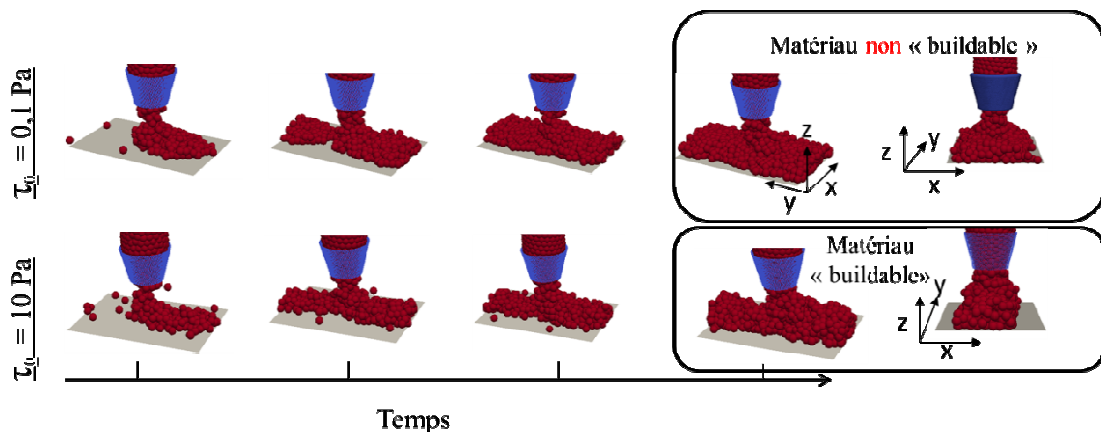


Figure 8: Influence du seuil de cisaillement microscopique (τ_0) sur la buildabilité du mortier modélisé.

5.3 Influence du diamètre de la buse sur l'extrudabilité du mortier modélisé

Dans cette section, le modèle numérique développé est utilisé pour étudier l'influence du diamètre de la base inférieure de la buse sur le blocage du matériau modélisé. Le terme Buse R1-R2 signifie que les

rayons de la base supérieure et inférieure de la buse sont respectivement $R1$ mm et $R2$ mm (Figure 9 – a). Nous avons changé le rayon de la base inférieure de 1 à 3,5 mm, alors que le rayon de la base supérieure est fixé à 5 mm (égal au rayon du tube).

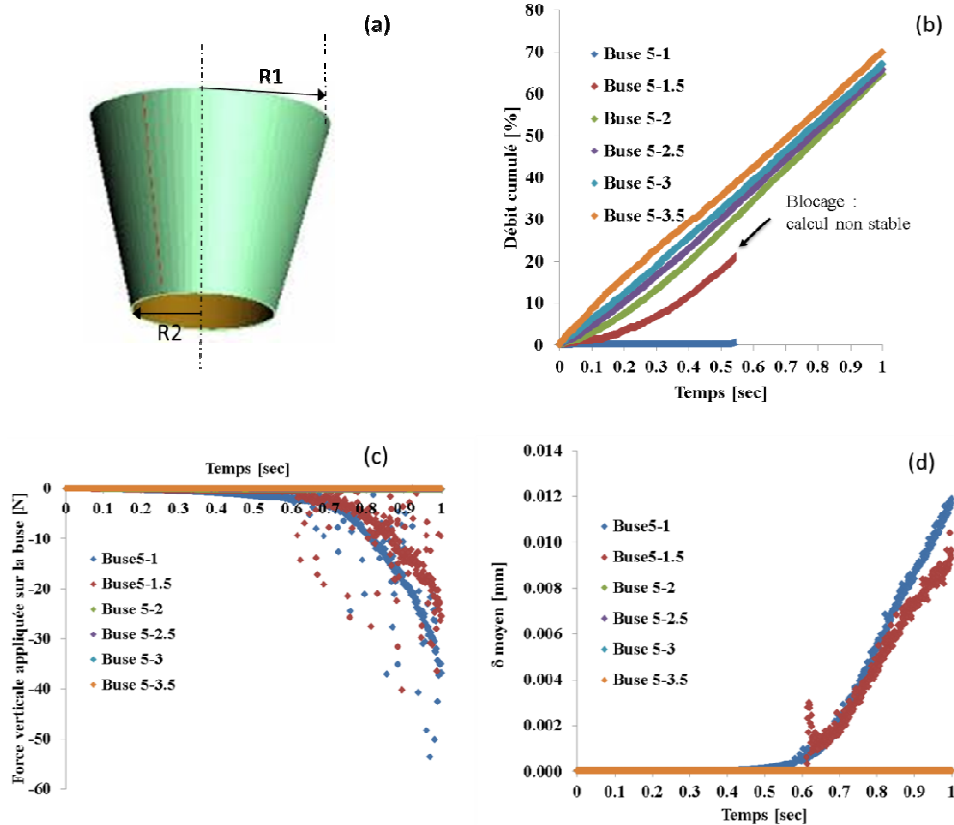


Figure 9: influence du diamètre de la base inférieure de la buse sur le débit cumulé (b), force verticale appliquée sur la buse (c) et recouvrement moyen entre grains solides (d).

La figure 9 – b montre le débit cumulé calculé au cours du temps pour les 6 ouvertures étudiées. Ce débit représente le pourcentage de particules sorties de la buse par rapport au nombre total de particules initialement placées dans le pistolet. Les résultats montrent que pour un rayon $R2$ supérieur ou égal à 2 mm le débit est continu ce qui se traduit par une évolution linéaire (pente de la droite constante). En revanche, pour un rayon $R2$ inférieur à 2 mm le matériau est considéré comme non extrudable. En effet, pour $R2$ égal à 1,5 mm, au début de l'impression le matériau sort de la buse sans blocage mais avec un débit plus faible par rapport à un $R2$ supérieur ou égale à 2 mm. Après 0,5 secondes un blocage est observé et le matériau ne sort plus de la buse. Pour un rayon $R2$ de 1 mm, quelques particules quittent la buse et le reste du matériau est bloqué. A noter que le plateau supérieur se déplace verticalement vers le bas à vitesse constante cela signifie que lors du blocage, le plateau supérieur exerce une pression sur le matériau et ce dernier exerce par la suite une force verticale importante sur la buse. La figure 9 – c montre que pour les rayons $R2$ de 1 et 1,5 mm la force verticale appliquée par les particules de matériau sur la buse devient très importante. Lorsque le matériau exerce une force importante sur la buse le recouvrement (δ) entre les grains du milieu et les sphères de la buse devient non nul [Fig. 9 – d] et le calcul devient instable.

6. Conclusion

La démarche suivie à l'Ecole des Mines de Douai pour la formulation de matériaux cimentaires a été présentée. Deux approches sont considérées. En premier lieu, une approche expérimentale a conduit au développement d'un nouveau liant permettant de contrôler précisément les cinétiques de prise et de durcissement des mortiers imprimables en utilisant un dispositif manuel. En second lieu, une approche numérique est mise en œuvre pour aider à une meilleure compréhension de la relation entre les paramètres de formulation du mortier, ses propriétés rhéologiques et les contraintes liées au dispositif d'impression. Tout au long de cette étude, une méthodologie pour la formulation des matériaux cimentaires est mise au point. La suite du travail portera sur l'utilisation d'une pompe à mortier pour tester à une plus grande échelle l'efficacité du matériau développé. Plus tard, cette pompe sera reliée à une imprimante 3D permettant de réaliser des pièces de 1m³.

7. Remerciement

Les auteurs remercient la région Hauts de France et le fonds Feder pour le financement du projet MATRICE, dans le cadre duquel ce travail est réalisé.

8. Références

- The American Society for Testing and Materials (ASTM) group "ASTM F42 – Additive Manufacturing".
- Weller, C. Kleer, R. et Piller F.T. (2015) Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited, *Int. J. Production Economics*, ASCE, 164: 43-56.
- Cundall, P. A. et Strack, O. D. L. (1979) A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*, 29: 47-65.
- Rémond, S. and Pizette, P. (2014) A DEM hard-core soft-shell model for the simulation of concrete flow, *Cement and Concrete research*, 58: 169-178..
- Widom, B. (1966), Random Sequential Addition of Hard Spheres to a Volume, *The Journal of Chemical Physics*, 44: 3888-3894.