

# Formulation de béton pour l'impression 3D basée sur l'empilement granulaire.

Victor De Bono<sup>1,2</sup>, Nicolas Ducoulombier<sup>2</sup>, Romain, Mesnil<sup>1,3</sup>, Jean-François Caron<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Navier, Ecole des Ponts ParisTech, Univ. Gustave Eiffel, CNRS, Marne la Vallée, France

<sup>2</sup> XtreeE, Rungis, France

<sup>3</sup> Build'In, Ecole des ponts ParisTech, marne la vallée France,

**RÉSUMÉ** L'impression 3D permet de fabriquer des structures en disposant la matière aux endroits stratégiques, fabriquer des géométries creuses et limiter ainsi les ressources utilisées. Dans le cadre de l'impression 3D de béton à grande échelle appliquée au secteur de la construction, une optimisation et une étude du mélange utilisé sont nécessaires afin de ne pas consommer abusivement de ciments. Cet article se propose d'utiliser des modèles d'empilement granulaire (notamment le modèle de l'empilement compressible) pour formuler des bétons imprimables et réduire les quantités de ciments en substituant une partie par des liants alternatifs. Le respect du cahier des charges pour un process d'impression 3D y est détaillé : pompabilité, extrudabilité et structurabilité. Les performances mécaniques de différents mélanges sont comparées, en flexion et compression puis sont validées lors d'une session d'impression 3D en laboratoire.

**Mots-clés** : Impression 3D, empilement granulaire, formulation, béton.

## INTRODUCTION

Un des objectifs de la fabrication additive est de réduire les quantités de matière nécessaire pour fabriquer un objet, en disposant la matière uniquement au bon endroit. Actuellement, l'impact environnemental d'une majorité des bétons imprimables est supérieur à celui des bétons traditionnels, à cause de leur haute teneur en clinker (Flatt and Wangler, 2022). Au laboratoire Navier, nous utilisons principalement le mix 3DPG, un matériau dérivé du Ductal développé par Lafarge Holcim. Sa composition n'est pas communiquée et sa résistance mécanique élevée s'accompagne d'un impact environnemental important. Néanmoins, il semble possible de réduire la teneur en clinker d'un mélange en utilisant une stratégie d'empilement granulaire optimisée. De plus, des résistances mécaniques plus faibles peuvent également être recherchées et attendues dans le cadre d'applications où la matrice cimentaire est renforcée et/ou un comportement de multi-fissuration est souhaité comme mode de rupture (Li and Wu, 1992). Ce qui est le cas lors de processus de renforcement tel que le flow based pultrusion développé au laboratoire Navier (Caron et al., 2021; Demont et al., 2021). Ces réflexions nous ont conduit à développer notre propre formulation de béton imprimable, mais également de développer sa méthodologie pour s'adapter aux ressources disponibles localement et être facilement transposable.

Le développement de formule imprimable est un sujet d'actualité, et une majorité des recherches se concentrent sur des stratégies chimiques pour contrôler les propriétés rhéologiques de la matière (Wangler et al., 2022). Seules quelques études s'intéressent à l'optimisation de l'empilement du

squelette granulaire dans le cadre de mix dédiés à l'impression 3D (Kondepudi et al., 2022; Szabo et al., 2020), souvent en utilisant le modèle de Fuller-Thomson (Weng et al., 2018). Pourtant cette réflexion autour de la compacité du mélange se révèle être efficace dans de nombreux contextes et bien connue dans la communauté du béton (Chu et al., 2022; Denarié et al., 2021; Zhang et al., 2021), spécifiquement pour diminuer la teneur en ciment (Fennis, 2010).

Cette étude se concentre principalement sur l'utilisation du modèle d'empilement compressible pour développer des formules imprimables. La compacité d'empilement granulaire ( $\Phi$ ) correspond au volume occupé par les grains solides dans un volume donné. Cette compacité est directement reliée à la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une pâte (Raj et al., 2014; Sedran, 1999), et cette quantité d'eau impacte les performances mécaniques ainsi que la durabilité du béton (de Larrard, 2000; Singh et al., 2015). Dans cette étude, le modèle de l'empilement compressible ainsi que son utilisation pour contrôler les paramètres clés d'un processus d'impression 3D seront présentés. La méthode ainsi que les expérimentations sur différentes formules de béton seront détaillées par la suite.

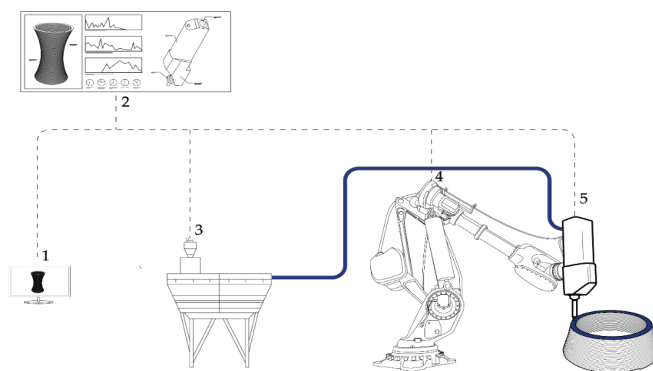
## CADRE THÉORIQUE

### *Processus d'impression 3D*

Le principe de l'impression 3D de béton consiste à empiler des couches de matière, leurs superpositions successives permettant de créer une géométrie. Pour cela, un modèle numérique de la future structure est nécessaire, celui-ci est ensuite converti en parcours robot. Les systèmes d'impressions sont souvent répartis en deux catégories, les mono-composants et les bi-composants. Les systèmes mono-composants consistent en la formulation d'un matériau à prise rapide en amont (ayant un seuil de cisaillement croissant durant les premières minutes.). Ce matériau est pompé directement jusqu'à une buse, et, grâce à sa grande vitesse de structuration, permet la superposition des couches. Les systèmes bi-composants, consistent en la formulation d'un matériau avec une grande ouvrabilité en amont (ayant un seuil de cisaillement stable au cours des premières minutes). Ce matériau est pompé jusqu'à la tête d'impression, où il est de nouveau mélangé avec l'ajout d'accélérateur de prise, augmentant significativement son seuil de cisaillement au moment de son extrusion, rendant alors possible la superposition de couches. Dans cette étude, nous utiliserons un système d'impression bi-composant et nous nous focaliserons sur la formulation de matériaux imprimables avec de tels systèmes.

Lors d'un processus d'impression 3D, le matériau doit avoir les propriétés rhéologiques permettant de répondre aux fonctions suivantes (Xiao et al., 2021):

- Pompabilité : pouvoir pomper le matériau du malaxeur jusqu'au robot sans blocage.
- Extrudabilité : pouvoir être mis en forme en sortie de buse
- Structurabilité : augmenter son seuil de cisaillements après extrusion pour être capable de supporter le poids des couches suivantes.



**FIGURE 1.** Principe d’impression 3D bi-composant XtreeE  
**1 : modèle numérique, 2 : transformation en parcours robot, 3 : malaxeur , 4 : Robot**  
**5 : Tête d’impression, ajout d’accélérateur.**

*Modèle de l’empilement compressible*

Le modèle de l’empilement compressible (MEC) a été développé par de Larrard (de Larrard, 2014, 2000), il est la troisième itération de modèles étudiant la compacité (Sedran, 1999). Son but est de prédire la compacité d’un mélange de composants granulaires polydispersés de n classe granulaires. Cette compacité est obtenue en regardant la compacité virtuelle maximale (la compacité obtenue si chaque grain est disposé à la main à sa position optimale) et est ensuite calibrée pour retrouver la compacité réelle C à partir de la compacité virtuelle  $\gamma$ , la compacité virtuelle  $\beta_i$  de la classe granulaire i, l’effet de bord  $a_{ij}$ , l’effet de parois  $b_{ij}$ , les proportions volumiques de chaque composant  $y$  et l’indice de compaction K. Tous ces paramètres sont calibrés et détaillés dans les études (Sedran et al., 2007, 1994).

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[ 1 - \beta_i + b_{ij}\beta_i \left( 1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] y_j - \sum_{j=i+1}^n \left[ 1 - \frac{a_{ij}\beta_i}{\beta_j} \right] y_j} \tag{1}$$

$$K = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{C} - \frac{1}{\gamma_i}} \right) \tag{2}$$

Les équations (1) et (2) peuvent être utilisées pour prédire la compacité d’un mélange donné. Nous les utiliserons pour trouver les proportions d’un mélange maximisant la compacité. Pour cela il est nécessaire de connaître préalablement la granulométrie et la compacité intrinsèque de chaque constituant (Sedran et al., 1994). Il est intéressant de noter que la compacité gouverne les propriétés rhéologiques du mélange. Celle-ci étant liée à la distance entre chaque particule pour une quantité d’eau donnée, elle impacte leurs capacités d’interactions physiques et chimiques La compacité a également un impact sur le seuil de cisaillement et le taux de structuration du matériau, comme cela a été montré dans (Mahaut et al., 2008).

*Approche physique de l’excès de pâte de ciment*

À l’aide du MEC, nous pouvons identifier les proportions idéales de chaque composant pour obtenir la compacité maximale. Qu’en est-il si celle-ci est obtenue lorsque le mélange est constitué uniquement de granulats sans aucun liant ? Cela pose la question du pourcentage minimum de

liant nécessaire pour enrober les granulats, et a été étudiée par les rhéologues avec différentes approches (Roussel, 2006; Toutou and Roussel, 2006). Certains l'abordent d'un point de vue géométrique (Reinhardt and Wüstholtz, 2007; Zhang et al., 2019) tandis que d'autres l'abordent à l'aide de simulations numériques (Wu et al., 2022). Dans les travaux (Hafid et al., 2016; Yammine et al., 2008) une approche physique est développée basée sur le « Radom loose packing ». Il y est démontré qu'une transition dans les propriétés rhéologiques du béton existe, entre un régime dominé par la friction des granulats et un régime dominé par les interactions hydrodynamiques. Nous appelons  $\phi_c$  la fraction volumique critique d'empilement des granulats et  $\phi_m$  sa fraction volumique d'empilement maximale. Dans le cas de sphère de même diamètre,  $\phi_m = 0,64$  (Cumberland and Crawford, 1987) et  $\phi_c = 0,5$  (Onoda and Liniger, 1990), et  $\phi_c/\phi_m = 0.79$ . Dans le cas de particules polydispersées (le cas réel) nous chercherons la fraction volumique critique des agrégats selon la relation :  $\phi_c = 0.79 * \phi_m$  (Yammine et al., 2008).

#### *Rapport eau/liant*

Le rapport eau sur ciment E/C varie entre 0,2 et 0,6 dans la majorité des bétons (Roussel et al., 2010) et un superplastifiant est généralement utilisé pour obtenir les rapports E/C les plus bas. Le ciment n'étant pas le seul liant possible dans la composition du béton, il est judicieux de s'intéresser au rapport eau sur liant, E/L. Il existe communément quatre liants de substitution (Juenger et al., 2011) : les laitiers des hauts fourneaux, les cendres volantes, la fumée de silice et le calcaire. Lors de leurs utilisations, un facteur k est introduit pour décrire la partie de ce matériau supplémentaire ayant les mêmes propriétés équivalentes qu'un ciment Portland (Bijen and van Selst, 1993). Ce facteur est désormais utilisé dans les normes européennes, et nous utilisons le complément national français ("NF EN 206/CN") dans cet article. Notons que ce complément introduit un ratio maximum de liant complémentaire, qui est de 0,11 dans le cadre de la fumée de silice.

## EXPÉRIENCES

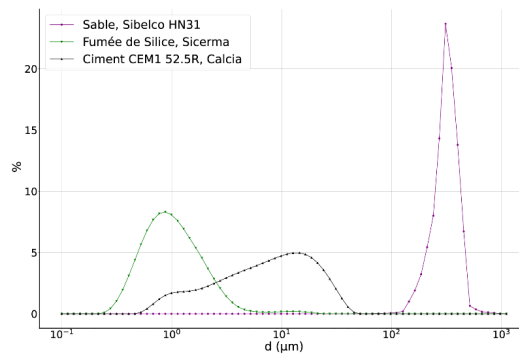
#### *Matériaux*

Dans cette étude, nous avons réalisé différents mélanges des constituants solides suivants :

**TABLEAU 1. Composants secs utilisés pour la formulation**

Nom	Compacité	Masse volumique (g/m <sup>3</sup> )
Ciment, Calcia CEM 1, 52,5R	0.52	3.15
Sable, Sibelco HN 31	0.65	2.65
Fumée de silice, Sicercil Z90 non compacté	0.61	2.15

Les masses volumiques ont été données par les fabricants, la compacité a été mesurée à l'aide de tests de demande en eau (Sedran, 1999) pour le ciment et la fumée de silice. La compacité du sable a été mesurée à sec sous un confinement égale à 1 KPa (Sedran, 1999). Les courbes granulométriques du ciment et de la fumée de silice ont été mesurées en réalisant des suspensions à l'éthanol à l'aide d'un analyseur laser, tandis que celle du sablon a été réalisée par tamisage successif. Les trois courbes sont rassemblées dans le graphe de la figure 2. Pour répondre à la problématique de la pompabilité et réduire le rapport E/C, un superplastifiant a été utilisé, appelé F9 (Chryso fluid optima 100).



**FIGURE 2.** Courbe granulométrique des constituants utilisés

*Méthode*

21 mélanges ont été réalisés à petite échelle, pour 1 litre de poudres mélangées au pétrin Hobart. Les poudres sont mélangées à sec pendant 3 minutes. L’eau et le superplastifiant sont ensuite ajoutés pendant 30 secondes durant lesquelles le pétrin continue de mélanger. Ensuite la pâte obtenue est mélangée durant 4 minutes à grande vitesse, pour ensuite réaliser un test au cône d’Abrams pour mesurer le seuil de cisaillement du matériau. La matière restante est coulée dans un moule en polystyrène pour obtenir 3 éprouvettes de 4\*4\*16 cm pour chaque formulation. Chaque moule est immergé dans l’eau le lendemain du coulage pour réaliser une cure durant 27 jours. Ces éprouvettes ont été cassées à 27 jours en flexion 3 points, puis les deux blocs résiduels issus de la rupture de chaque éprouvette ont été cassés à 28j en compression à l’aide d’un presse électrique Instron.

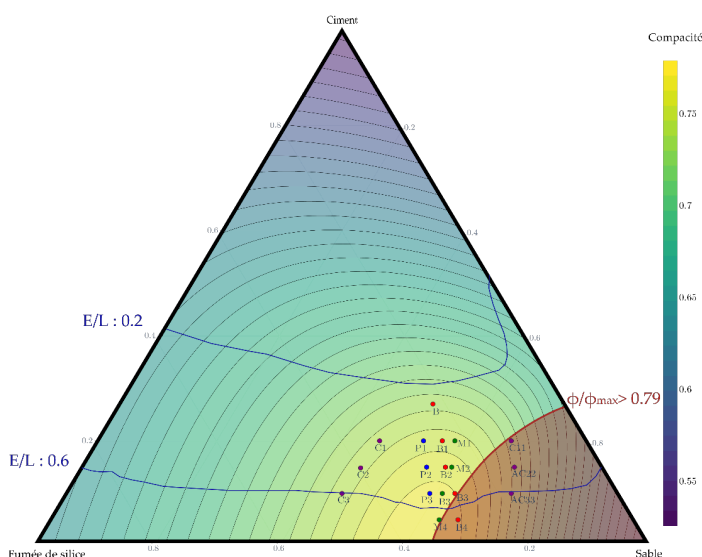
*Formules*

Connaissant les granulométries et compacités de nos poudres respectives, nous pouvons tracer le diagramme ternaire représentant la compacité réelle de nos futures formulations en fonction des proportions volumiques de chaque constituant. 4 stratégies de formules différentes ont été réalisées, chacune d’entre elles faisant varier les quantités de ciments : M : pour les formules ayant la compacité maximale. B : se basant sur le travail de (Ducoulombier, 2020) en conservant le rapport volumique du sable sur la fumée de silice constante. C : se basant sur le travail de (Ducoulombier, 2020) en conservant la même compacité et P : pour obtenir plus de données. Voici le détail de ces formules, également représentées sur la figure 3 :

**TABLEAU 2.** Formules réalisées

Nom	Ciment (g)	Fumée de silice (g)	Sable (g)	Compacité	F9 (g)	Eau (g)	E/C	Seuil mesuré (Pa)
B	600	400	980	77.3	11	213	0.355	200
B1	447.3	426	1053.64	77	11	213	0.476	82
B2	335.475	461.5	1110.085	77	11	200	0.596	45
B3	223.65	479.25	1185.345	78	11	160	0.715	98
B4	111.825	514.75	1241.79	78	11	160	1.431	46
M1	447.3	390.5	1091.27	77	11	213	0.476	47
M1'	447.3	390.5	1091.27	77	11	160	0.357	988
M2	335.475	443.75	1128.9	77	11	200	0.596	38

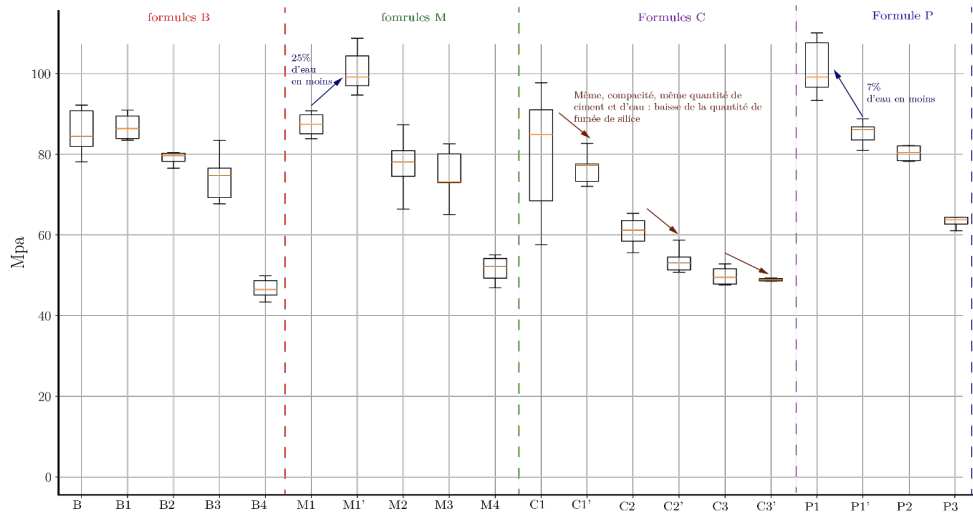
M3	223.65	514.75	1147.715	78	11	160	0.715	48
M4	111.825	568	1185.345	78	11	160	1.431	173
C1	447.3	603.5	865.49	75.4	11	220	0.491	94
C12	447.3	230.75	1260.605	75.4	11	220	0.491	672
C2	335.475	710	846.675	75.4	11	230	0.685	25
C22	335.475	266.25	1317.05	75.4	11	230	0.685	1100
C3	223.65	798.75	846.675	75.4	11	240	1.07	66
C33	223.65	319.5	1354.68	75.4	11	240	1.07	440
P1	447.3	479.25	997.195	76.7	11	200	0.447	140
P1'	447.3	479.25	997.195	76.7	11	213	0.476	25
P2	335.475	514.75	1053.64	77.5	11	200	0.596	40
P2'	335.475	514.75	1053.64	77.5	11	160	0.476	160
P3	223.65	550.25	1110.085	78	11	160	0.715	31



**FIGURE 3.** Diagramme ternaire de la compacité calculée par le MEC en fonction des proportions volumiques du ciment, sable et fumée de silice.

### RÉSULTATS

Les résistances à la compression obtenue à 28 jours sur éprouvettes cubiques sont présentées dans la figure 4. L'impact du ratio E/C est clairement identifiable en comparant les formules où seule la quantité d'eau change (M1 vs M1', P1 vs P1'). Pour les formules C où la compacité est toujours la même et la quantité de ciment identique par paires, l'impact de la fumée de silice sur les performances mécaniques est observable.

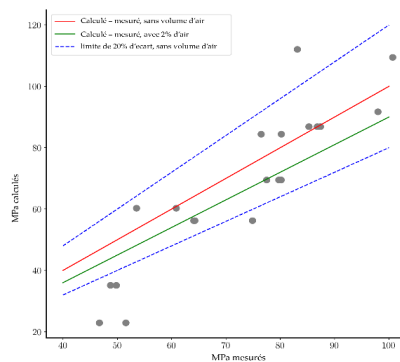


**FIGURE 4.** Résultats des valeurs de compression à 28 jours sur éprouvettes cubiques.

Nous pouvons utiliser l'équation de Féret sur nos données :

$$f'c = K_F \left( \frac{V_c + kV_p}{V_c + kV_p + kV_e + V_a} \right)^2 \tag{3}$$

Où  $f'c$  représente la compression à 28 jours en MPa,  $V_c$ ,  $V_p$ ,  $V_e$ ,  $V_a$  sont respectivement les volumes de ciment, de liant de substitution, d'eau et d'air.  $K_F$  est un coefficient dépendant du liant et des granulats employés, avec une régression linéaire sur nos données, nous obtenons :  $K_F = 5.7 * 52.5$ . La figure 5 montre la différence entre la résistance à la compression mesurée et celle calculée grâce à l'équation (3). Le volume d'air n'a pas été mesuré sur ces mélanges, sur la figure 5, nous voyons que 2% de volume d'air diminue approximativement les performances mécaniques de 10%. Ces figures et équations nous montrent que (3) est une bonne première approximation des performances, mais est moins pertinente sur les formules contenant beaucoup de liant de substitution et peu de ciment.



**FIGURE 5.** Calcul versus mesure des résistances à la compression.

Suite à ces expérimentations, nous avons réalisé deux sessions d'impressions 3D grande échelle au laboratoire Navier avec les formules B et M4. Chacune des sessions a environ duré 40 minutes d'impression, durant lesquelles nous avons validé la pompabilité, l'extrudabilité et la structurabilité : en utilisant un accélérateur (composé de sels d'aluminium) dosé à 6ml par kilogramme de béton. Les poudres ont été insérées en même temps dans le malaxeur, l'eau et le superplastifiant ont été ajoutés ensuite pendant 1 minute, puis la mixture a été mélangée durant 6 minutes avant d'être pompée. La session d'impression avec la formule M4 a été stoppée de façon précoce, du fait de l'épuisement du stock de fumée de silice (ce produit n'étant plus sur le marché). Nous notons des défauts qualitatifs sur les impressions, surtout avec la formule M4, cela est probablement dû à l'utilisation de la fumée de silice qui est difficilement dispersable, ce qui laisse apparaître des floques, ces derniers n'étant visibles que lors du passage à la grande échelle.



FIGURE 8. Impression 3D d'une hyperbole de 1m de haut, formule B à gauche, formule M4 à droite

## CONCLUSION ET DISCUSSION

Dans cette étude, deux impressions 3D ont été réalisées avec des formules de béton optimisées grâce au MEC. Puisque la quantité d'eau est liée à la compacité du mélange des poudres, optimiser cette compacité est un bon moyen d'améliorer les performances mécaniques d'une formule, ou de baisser les quantités de ciments utilisés. De plus, la compacité est également liée au seuil de cisaillement et au taux de structuration, qui sont des paramètres essentiels dans un processus d'impression 3D. Ainsi, l'usage de modèle d'empilement granulaire tel que le MEC, semble être pertinent pour formuler des bétons imprimables. Nous proposons la méthode suivante :

- Selon l'application, il est nécessaire de déterminer les composants adéquats (ciments, liants de substitution, sables, etc). L'objectif étant de maximiser la compacité pour minimiser la quantité d'eau nécessaire.
- À l'aide des granulométries et compacités respectives des constituants, il est possible de déterminer la compacité de différents mélanges avec le MEC
- Les formules adéquates se situeront dans les zones où  $E/L$  est compris entre 0.2 et 0.6, ainsi que lorsque le régime de friction entre les granulats n'apparaît pas,  $\phi_c < 0.79 * \phi_m$ .



- Avec une bonne optimisation granulaire, les quantités de ciments peuvent être diminuées tout en conservant des propriétés mécaniques intéressantes et sous-estimées par les modèles d'estimation usuels des performances.

Pour le moment, nous observons que la fumée de silice cause des irrégularités et des troubles de qualité du fait de leur difficulté de dispersion. Le protocole de mélange et d'introduction des poudres reste à améliorer si l'emploi de fumée de silice est envisagé. Par ailleurs, nous observons que la norme NEF 206 limite l'utilisation de cette dernière comme liant de substitution. Nos résultats questionnent cette limitation, puisque les propriétés mécaniques intéressantes obtenues, autour de 50 MPa, sont très intéressantes même pour un rapport volumique de ciment sur fumée de silice de 1/6.

Enfin, bien que cette étude se soit focalisée sur une formulation à partir de 3 constituants, il est bien entendu possible d'étendre ce travail avec de nombreux autres constituants tels que des cendres volantes, des fillers calcaires, des métakaolins, etc. mais aussi d'autres liants tels que les kaolins, les géopolymère, le plâtre, etc. Ceci étant possible grâce au caractère universel de l'étude de l'empilement granulaire réalisé ici à l'aide du MEC, bien qu'initialement conçu pour des bétons de ciment.

## RÉFÉRENCES

- Bijen, J., van Selst, R., 1993. Cement equivalence factors for fly ash. *Cement and Concrete Research* 23, 1029–1039. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90162-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90162-3)
- Caron, J.-F., Demont, L., Ducoulombier, N., Mesnil, R., 2021. 3D printing of mortar with continuous fibres: Principle, properties and potential for application. *Automation in Construction* 129, 103806. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103806>
- Chu, S.H., Lam, W.L., Li, L., Poon, C.S., 2022. Packing density of ternary cementitious particles based on wet packing method. *Powder Technology* 405, 117493. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117493>
- Cumberland, D.J., Crawford, R.J., 1987. *The packing of particles*.
- de Larrard, F., 2014. *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*. CRC Press, London. <https://doi.org/10.1201/9781482272055>
- de Larrard, F., 2000. *Structures granulaires et formulation des bétons*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- Demont, L., Ducoulombier, N., Mesnil, R., Caron, J.-F., 2021. Flow-based pultrusion of continuous fibers for cement-based composite material and additive manufacturing: rheological and technological requirements. *Composite Structures* 262, 113564. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113564>
- Denarié, E., Sofia, L., Gonnon, P. (Eds.), 2021. *Towards tailored cement-based materials with ground calcium carbonates. Proceedings of the International Conference on "Cement – Based Materials Tailored for a Sustainable Future."*
- Ducoulombier, N., 2020. *Anisotropic concrete : 3D printing of concrete reinforced by long fibers, process, characterisation et modelisation*. (phdthesis). Université Paris-Est.
- Fennis, S., 2010. *Design of ecological concrete by particle packing optimization*.
- Flatt, R.J., Wangler, T., 2022. On sustainability and digital fabrication with concrete. *Cement and Concrete Research* 158, 106837. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106837>
- Hafid, H., Ovarlez, G., Toussaint, F., Jezequel, P.H., Roussel, N., 2016. Effect of particle morphological parameters on sand grains packing properties and rheology of model mortars. *Cement and Concrete Research* 80, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.11.002>
- Juenger, M.C.G., Winnefeld, F., Provis, J.L., Ideker, J.H., 2011. *Advances in alternative cementitious binders*. *Cement and Concrete Research, Conferences Special: Cement Hydration Kinetics and Modeling*, Quebec City, 2009 & CONMOD10, Lausanne, 2010 41, 1232–1243. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012>
- Kondepudi, K., Subramaniam, K.V.L., Nematollahi, B., Bong, S.H., Sanjayan, J., 2022. Study of particle packing and paste rheology in alkali activated mixtures to meet the rheology demands of 3D Concrete Printing. *Cement and Concrete Composites* 131, 104581. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104581>

- Li, V.C., Wu, H.-C., 1992. Conditions for Pseudo Strain-Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites. *Applied Mechanics Reviews* 45, 390–398. <https://doi.org/10.1115/1.3119767>
- Mahaut, F., Mokéddem, S., Chateau, X., Roussel, N., Ovarlez, G., 2008. Effect of coarse particle volume fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials. *Cement and Concrete Research* 38, 1276–1285. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.06.001>
- NF EN 206/CN : Béton – Spécification, performance, production et conformité. Complément national à la norme NF EN 206. Brussels: European committee for standardisation, 2022 [WWW Document], n.d. URL <https://cobaz-afnor-org.extranet.enpc.fr/notice/norme/nf-en-206a2-cn/FA203976?rechercheID=10675967&searchIndex=1&activeTab=all> (accessed 11.24.22).
- Onoda, G.Y., Liniger, E.G., 1990. Random loose packings of uniform spheres and the dilatancy onset. *Phys. Rev. Lett.* 64, 2727–2730. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.64.2727>
- Raj, N., Patil, S., Bhattacharjee, B., 2014. Concrete Mix Design By Packing Density Method. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* 11, 34–46. <https://doi.org/10.9790/1684-11213446>
- Reinhardt, H.W., Wüstholtz, T., 2007. About the influence of the content and composition of the aggregates on the rheological behaviour of self-compacting concrete. *Mater Struct* 39, 683–693. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9102-3>
- Roussel, N., 2006. A Theoretical Frame to Study Stability of Fresh Concrete. *Mater Struct* 39, 81–91. <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9036-1>
- Roussel, N., Lemaître, A., Flatt, R.J., Coussot, P., 2010. Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of the art. *Cement and Concrete Research* 40, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.026>
- Sedran, T., 1999. Rheologie et rheometrie des betons. Application aux betons autonivelants (thesis). <http://www.theses.fr.Marne-la-vallée, ENPC>.
- Sedran, T., de Larrard, F., Angot, D., 1994. Prévion de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide. II- Validation, cas des mélanges confinés. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées* 194, pp 71-86.
- Sedran, T., de Larrard, F., Le Guen, L., 2007. Détermination de la compacité des ciments et additions minérales à la sonde de Vicat. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* pp 155-163.
- Singh, S.B., Munjal, P., Thammishetti, N., 2015. Role of water/cement ratio on strength development of cement mortar. *Journal of Building Engineering* 4, 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.job.2015.09.003>
- Szabo, A., Reiter, L., Lloret-Fritschi, E., Gramazio, F., Kohler, M., Flatt, R.J., 2020. Mastering Yield Stress Evolution and Formwork Friction for Smart Dynamic Casting. *Materials* 13, 2084. <https://doi.org/10.3390/ma13092084>
- Toutou, Z., Roussel, N., 2006. Multi Scale Experimental Study of Concrete Rheology: From Water Scale to Gravel Scale. *Mater Struct* 39, 189–199. <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9047-y>
- Wangler, T., Pileggi, R., Gürel, S., Flatt, R.J., 2022. A chemical process engineering look at digital concrete processes: critical step design, inline mixing, and scaleup. *Cement and Concrete Research* 155, 106782. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106782>
- Weng, Y., Li, M., Tan, M.J., Qian, S., 2018. Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model. *Construction and Building Materials* 163, 600–610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.112>
- Wu, J., Zhou, X., Zeng, X., Xie, Y., Long, G., Dong, R., Abdullahi Umar, H., Ma, G., Yao, L., 2022. Effect of aggregate morphology characteristics on the voidage of aggregate loose packing based on 3D discrete element method. *Construction and Building Materials* 348, 128598. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128598>
- Yamine, J., Chaouche, M., Guerin, M., Moranville, M., Roussel, N., 2008. From ordinary rheology concrete to self compacting concrete: A transition between frictional and hydrodynamic interactions. *Cement and Concrete Research* 38, 890–896. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.011>
- Zhang, C., Hou, Z., Chen, C., Zhang, Y., Mechtcherine, V., Sun, Z., 2019. Design of 3D printable concrete based on the relationship between flowability of cement paste and optimum aggregate content. *Cement and Concrete Composites* 104, 103406. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103406>
- Zhang, C., Nerella, V.N., Krishna, A., Wang, S., Zhang, Y., Mechtcherine, V., Banthia, N., 2021. Mix design concepts for 3D printable concrete: A review. *Cement and Concrete Composites* 122, 104155. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104155>