

Essai de caractérisation rhéologique d'un mortier imprimé en 3D

Ta Minh Phuong Bao¹, Luc Courard¹

¹ *Urban and Environmental Engineering, Building Materials, University of Liège, 4000 Liège, Belgium*

RESUME

La technologie de construction par impression 3D représente une méthode innovante et prometteuse pour l'avenir du bâtiment. Elle permet une exécution plus rapide, une réduction des coûts et un impact environnemental moindre. Cependant, cette méthode requiert des caractéristiques techniques spécifiques : le matériau doit être suffisamment fluide pour être extrudé, tout en étant assez ferme pour supporter les couches successives. Pour répondre à ces exigences, il est essentiel de comprendre le comportement rhéologique du mortier, notamment à travers deux paramètres clés du modèle de Bingham, auquel le mortier peut être assimilé : la viscosité et le seuil de cisaillement. En laboratoire, ces paramètres sont mesurés à l'aide d'un rhéomètre. Toutefois, en conditions de chantier, cette approche est peu pratique. Il est donc nécessaire de développer un essai plus simple pour évaluer rapidement l'aptitude du mortier à l'impression 3D. Plusieurs essais ont été étudiés afin d'identifier la méthode la plus adaptée à cette technologie.

Mots-clés : béton imprimé en 3D, mortiers, niveau de cisaillement, contrainte de cisaillement, viscosité, consistance, mesures de rhéologie

Modalité de présentation Présentation orale

I. INTRODUCTION

L'introduction de la technologie d'impression 3D dans le secteur de la construction représente un tournant révolutionnaire, permettant la réalisation de conceptions complexes et de structures sophistiquées avec une précision et une efficacité remarquables (De Schutter et al., 2018; Gosselin et al., 2016; Ungureanu et al., 2023; Wang et al., 2023). Cette technologie, en passe de devenir une tendance majeure dans le domaine du logement résidentiel, offre plusieurs avantages notables (Zhang et al., 2019). Les méthodes de construction traditionnelles, basées sur l'utilisation de coffrages, ont peu évolué depuis leur apparition sous l'Empire romain (Li et al., 2022). Cependant,

les défis contemporains tels que la pénurie de logements, provoquée par la croissance démographique, l'urbanisation et des facteurs économiques, exigent des approches innovantes en matière de construction. L'impression 3D répond efficacement à ces enjeux en permettant la construction rapide de logements — jusqu'à 20 fois plus rapide que les méthodes conventionnelles — tout en améliorant la durabilité des composants et en éliminant les contraintes liées à la conception architecturale (Siddika et al., 2020; Solodziuk, 2023). Par conséquent, l'impression 3D a le potentiel de redéfinir l'avenir de la construction.

Le béton imprimé en 3D est une composition spécifique, développée pour être acheminée puis extrudée à travers un système d'impression. La réussite de cette technologie dépend d'un contrôle rigoureux de la stabilité du matériau durant tout le processus de construction. Divers essais permettent d'en évaluer les propriétés, l'un des plus couramment utilisés étant le test de la table à flux. Y. Zhang et al. (Zhang et al., 2018) ont souligné que, dans le cadre du béton destiné à l'impression 3D, le paramètre central évalué par ce test est la capacité d'écoulement. Celle-ci est déterminée en mesurant le diamètre d'étalement du mélange à différents intervalles : 0, 15, 30, 45 et 60 minutes après le malaxage. Leur étude révèle que les mélanges de béton conçus pour l'impression 3D conservent bien leur forme, avec une perte d'écoulement limitée à 4 à 6 cm après une heure, par rapport à une fluidité initiale située entre 26 et 30 cm.

Par ailleurs, il existe d'autres techniques permettant d'évaluer l'uniformité du béton imprimé en 3D. Certaines recherches ont recours au test en entonnoir en V (V-funnel) pour analyser l'imprimabilité du béton frais destiné à l'impression 3D, tandis que d'autres l'associent à l'essai au pistolet. Les expérimentations menées par Pham et al. (Pham et al., 2022) ont démontré que le test en entonnoir en V offre une excellente corrélation avec les résultats expérimentaux dans l'évaluation d'un nouveau mélange de béton imprimé en 3D.

Les recherches sur la rhéologie du béton imprimé en 3D s'intéressent principalement à l'état frais des matériaux. Le et al. (Le et al., 2012) ont identifié trois propriétés fondamentales : l'extrudabilité, la maniabilité et le temps ouvert. Leur étude figure parmi les premières à s'être penchées sur les caractéristiques de l'état frais du béton destiné à l'impression 3D et sur la conception de mélanges dits « imprimables », bien qu'aucun paramètre rhéologique précis n'y ait été défini. Des travaux ultérieurs ont approfondi cette thématique en introduisant des paramètres clés tels que la viscosité et la contrainte d'écoulement pour évaluer plus facilement la qualité du matériau (Le et al., 2012; Rehman et al., 2024a). Ces deux paramètres — la contrainte d'écoulement et la viscosité — sont directement liés à la pompabilité, à l'extrudabilité et à la capacité de maintien en forme du béton imprimé en 3D (Kulichikhin and Malkin, 2022; Rubio et al., 2015; Stojkov et al., 2021; Tarhan and Şahin, 2021), des notions essentielles pour le développement de cette technologie.

Les études précédentes ont proposé de nombreuses méthodes pour évaluer la capacité d'impression des matériaux. Toutefois, aucune n'a encore déterminé quel outil serait le plus efficace pour cette évaluation. L'objectif de cette recherche est donc de trouver une solution à ce problème. En complément de l'utilisation d'un rhéomètre en laboratoire, il est également nécessaire de développer un test suffisamment simple pour analyser le comportement du mortier directement sur le chantier. Bien que ce test soit basique, il doit néanmoins permettre d'évaluer avec une précision raisonnable la pompabilité, la superposition des couches ainsi que

l'extrudabilité du matériau. L'étude consistera à réaliser plusieurs essais couramment utilisés pour identifier la méthode de mesure la plus adaptée au mortier destiné à l'impression 3D.

II. MATERIAUX ET METHODES

1. Matériaux

Quatre mélanges différents ont été utilisés. Le premier est un mortier de référence, préparé conformément à la norme EN:206, composé de 1350 g de sable standard, 445 g de ciment et 225 g d'eau. Bien qu'il ne s'agisse pas d'un mortier destiné à l'impression 3D, il a été utilisé comme référence bien connue. Les deux mélanges suivants, désignés respectivement comme mélanges A et B, sont des produits commerciaux spécifiquement conçus pour les procédés d'impression 3D.

Le mélange A a été choisi pour ses propriétés rhéologiques particulières par rapport aux mortiers conventionnels. Il présente une excellente pompabilité et extrudabilité via l'imprimante, ainsi qu'une résistance élevée à la flexion et à la compression. De plus, il offre une meilleure résistance à l'eau de mer et aux environnements sulfatiques. Un point crucial du mélange A est sa capacité de retrait compensé, qui empêche les composants imprimés en 3D de se fissurer après durcissement, ce qui est essentiel dans le processus d'impression.

Le mélange B possède également une haute résistance à la compression et présente plusieurs avantages pour l'impression 3D, notamment ses propriétés thixotropiques élevées qui permettent de personnaliser et de créer des conceptions architecturales complexes, ainsi que sa capacité à être superposé en plusieurs couches. En outre, son temps de prise court facilite le déplacement rapide des éléments vers l'emplacement souhaité, ce qui permet un gain de temps considérable.

Un nouveau mélange, nommé mélange C, a été formulé spécifiquement dans le cadre de ce projet. Son objectif principal est de concevoir un béton réfractaire qui conserve les propriétés essentielles requises pour l'impression 3D, telles que la facilité de pompage, l'extrusion efficace et la capacité à maintenir la forme des couches successives. Pour garantir sa résistance à des températures élevées, ce mélange est composé principalement de 73 % d'alumine tabulaire, 10 % d'alumine réactive et 5 % de ciment d'aluminate de calcium. S'y ajoutent des composants mineurs, notamment 1,5 % d'oxyde de calcium (CaO) et 0,1 % d'un agent rigidifiant.

Dans le cadre de l'étude comparative du comportement rhéologique des matériaux, l'analyse des mortiers imprimés en 3D existants est utile pour établir des caractéristiques de référence. Les détails concernant ces produits commerciaux sont présentés dans le [tableau 1](#).

TABLEAU 1. Caractéristiques détaillées des produits commerciaux

Type de Produit Propriétés	Mélange A	Mélange B	Mélange C
Liant	Ciment Portland	Ciment Portland	Aluminate de calcium et alumine réactive
Taille maximale des particules (mm)	1.60	1	5
Densité (g/cm ³)	2.20	2.14	2.90

Temps de prise initial (h)	8.50	0.75	/
Temps de prise final (h)	10	1.08	/
Résistance à la compression (MPa – 28 jours)	60	50	40

Les proportions en eau recommandées par les fabricants pour les mélanges A, B et C sont respectivement de 10 %, 18 % et 8 % du poids total. Afin d'évaluer la tolérance de ces formulations face aux variations des conditions d'impression, les teneurs en eau ont été modifiées — à l'exception du mélange de référence — en les augmentant ou diminuant de 1 à 2 %. Cette variation a permis de tester un total de dix formulations différentes, répertoriées dans le [tableau 2](#).

TABLEAU 2. Références des mélanges et teneur en eau

Numéro du mélange	ID du mélange	Teneur en eau (% en poids)
1	Référence	11.13%
2	A–9	9%
3	A–10	10%
4	A–11	11%
5	B–18	18%
6	B–20	20%
7	B–22	22%
8	C–7	7%
9	C–8	8%
10	C–9	9%

2. Méthodes d'essai pour la consistance

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer la consistance des mortiers, notamment pour les formulations auto-compactantes. Toutefois, ces essais n'ont pas été conçus spécifiquement pour les mortiers utilisés en impression 3D. Avant d'élaborer une procédure adaptée à ces nouveaux matériaux, il est essentiel d'examiner si les essais traditionnels permettent de distinguer efficacement les performances rhéologiques des mortiers destinés à l'impression.

Le premier essai pris en compte est celui de la table de secousse (Figure 1a), réalisé conformément à la norme EN 13395-1:2002. Ce test consiste à mesurer la capacité d'étalement du mortier, indicateur de sa maniabilité : après avoir fait tomber la table de manière verticale à 15 reprises, on mesure le diamètre d'étalement obtenu (Figure 1b). L'essai est répété à quatre reprises, à des intervalles de 0, 10, 20 et 30 minutes après le mélange, afin d'analyser l'évolution de la maniabilité du matériau dans le temps.

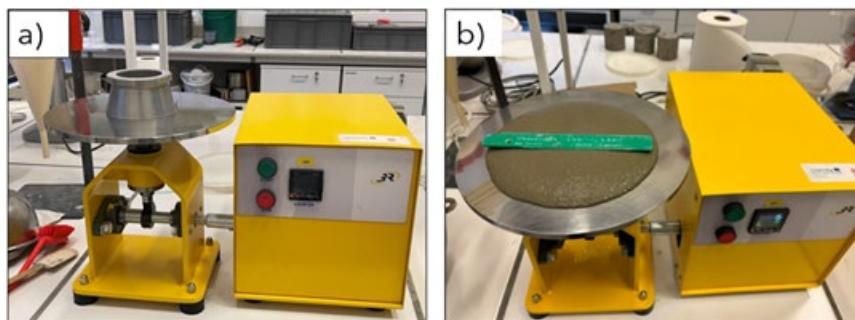


FIGURE 1. (a) Test sur table de secousse, (b) échantillon sur la table de secousse après 15 levées.

Le second essai proposé est le test à l'entonnoir en V ([Figure 2a](#)), réalisé selon la norme EN 12350-9:2010. Ce test mesure le temps nécessaire pour que le mortier s'écoule à travers un entonnoir. Bien qu'il ait été initialement conçu pour les mortiers auto-compactants, le comportement similaire au départ du mortier imprimé en 3D justifie son utilisation pour évaluer la consistance.

Le test du cône de chute ([Figure 2b](#)), conformément à la norme BS 1377-2:1990, est une autre méthode employée pour apprécier la consistance du mortier imprimé en 3D. Initialement développé pour déterminer la limite liquide des sols, ce test consiste à mesurer la profondeur de pénétration d'un cône dans l'échantillon. Le cône est placé sur la surface du matériau, puis laissé tomber librement dans le mortier, comme illustré sur la [Figure 2b](#). La profondeur de pénétration offre une indication précieuse sur la résistance du mortier à la déformation et sur sa consistance globale.

Enfin, le test au pistolet ([Figure 2c](#)) est une méthode couramment utilisée dans le domaine de l'impression 3D en construction pour évaluer la capacité du mortier à être extrudé et superposé. Le pistolet est équipé d'une buse de 1,6 cm de diamètre, d'un corps de 40 cm de longueur et d'un diamètre de 5,1 cm. Ce test consiste à imprimer un petit composant composé de cinq couches afin d'observer le comportement du matériau lors du processus d'impression. Il est essentiel pour comprendre la performance du mortier en conditions réelles, car il simule les contraintes du chantier et évalue la capacité du matériau à s'extruder de manière fluide tout en supportant la superposition des couches sans s'effondrer.

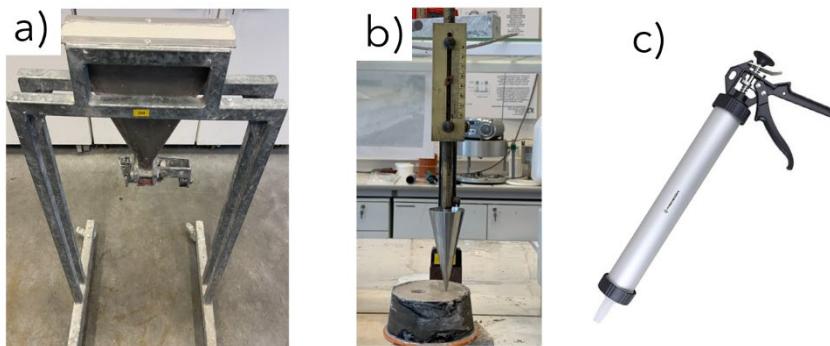


FIGURE 1. (a) Essai à l'entonnoir en V, (b) essai au cône de chute, c) essai au pistolet

III. Résultats

1. Table de secousse

Le mortier de référence présente généralement un diamètre d'étalement nettement inférieur à celui du mortier utilisé pour l'impression 3D ([Figure 2](#)). Cette différence est attendue, car le procédé d'impression 3D nécessite un matériau capable de s'écouler facilement à travers la buse de l'imprimante. En général, le mortier imprimé en 3D atteint un diamètre d'étalement d'environ 20 à 25 cm, ce qui représente probablement une plage optimale pour ce type d'application.

Pour le mélange A, le diamètre d'étalement varie fortement en fonction de la teneur en eau. Avec 9 % d'eau, il se situe entre 10 et 14 cm. Toutefois, une augmentation de seulement 1 % ou 2 % de la teneur en eau entraîne une hausse importante du diamètre d'étalement, atteignant environ 22 à 26 cm et 30 cm, respectivement (Figure 2a). En revanche, le mélange B montre un comportement opposé. Son diamètre d'étalement reste dans une plage relativement étroite, entre 17 et 22 cm, comme le montre la Figure 2b, ce qui indique une stabilité du comportement rhéologique malgré les variations de la teneur en eau. Le mélange C se situe entre les deux : il est moins sensible que le mélange A, mais moins stable que le mélange B. De manière générale, après 30 minutes de malaxage, le comportement du mortier reste relativement stable, avec des variations de l'étalement limitées à 1–6 cm (Figure 2c). Par ailleurs, l'ajout d'eau entraîne systématiquement une augmentation de la fluidité.

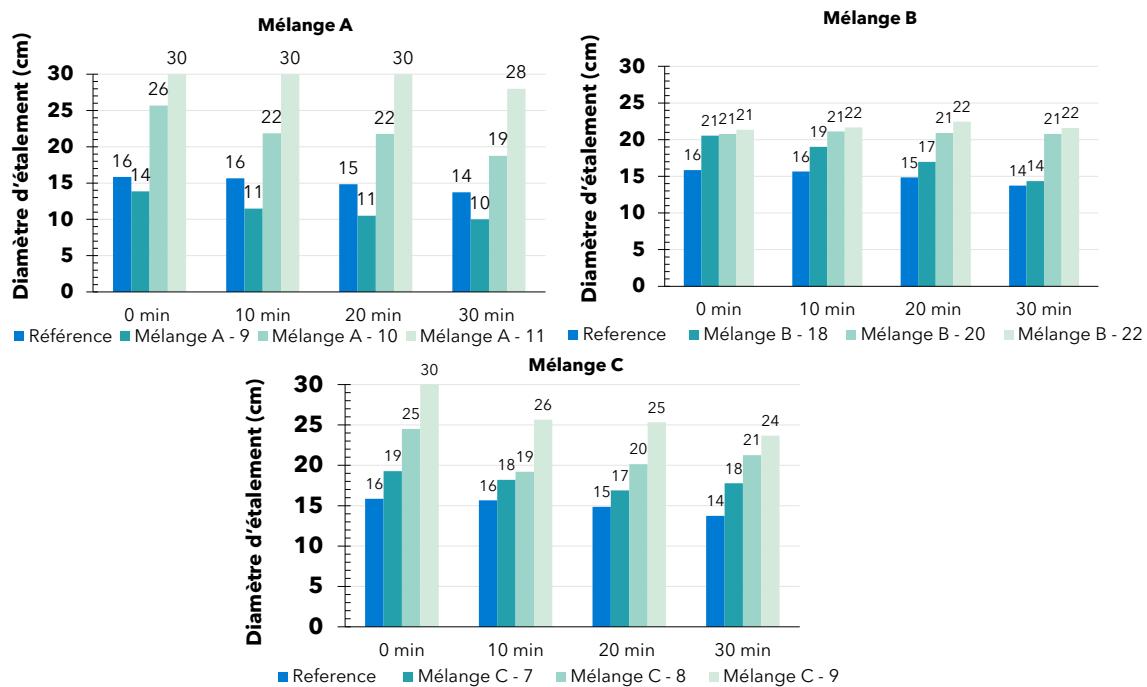


FIGURE 2. Résultats de l'essai d'étalement pour les différents mélanges : (a) mélange A avec 9 %, 10 % et 11 % d'eau ; (b) mélange B avec 18 %, 20 % et 22 % d'eau ; (c) mélange C avec 7 %, 8 % et 9 % d'eau

Ce test semble être une méthode utile pour évaluer le comportement des matériaux imprimés en 3D. Les résultats offrent une compréhension claire de la performance du matériau au fil du temps pour différents mélanges et soulignent les différences entre le mortier traditionnel et le mortier imprimé en 3D. De plus, le test a permis d'identifier le diamètre d'étalement optimal pour le procédé d'impression 3D, qui correspond à celui d'un produit commercial avec sa teneur en eau initiale (18–20 cm). Cette découverte est importante et pratique, car elle permet d'évaluer facilement la capacité d'impression du matériau sur le chantier à l'aide de quelques étapes simples.

2. Essai à l'entonnoir en V

Le test à l'entonnoir en V a été utilisé comme seconde méthode pour évaluer la consistance du mortier imprimé en 3D. Ce test a été réalisé à 0, 10, 20 et 30 minutes après le malaxage afin de suivre l'évolution de l'écoulement du mortier au fil du temps ([Figure 3](#)). Le mélange de référence n'a pas pu être évalué car il ne s'écoulait pas à travers l'entonnoir ([Figure 3a](#)), ce qui est cohérent avec sa faible fluidité comparée aux autres mélanges, comme illustré précédemment à la [Figure 2](#). De même, le mélange A avec 9 % d'eau n'a pas réussi à s'écouler. En revanche, le mélange A avec 10 % d'eau a mis environ 20 secondes à s'écouler, tandis que celui avec 11 % d'eau s'est écoulé en moyenne en seulement 10 secondes ([Figure 3b](#)), ce qui montre clairement que l'augmentation de la teneur en eau améliore la fluidité.

Concernant le mélange B, les résultats sont moins concluants puisque aucun des échantillons ne s'est écoulé à travers l'entonnoir ([Figure 3c](#)), ce qui limite l'évaluation du comportement du matériau. D'après ces observations portant sur seulement deux types de mélanges, il semble que le test à l'entonnoir en V ne soit pas adapté au mortier imprimé en 3D, car il ne fonctionne correctement que pour des mélanges à bonne fluidité. Cela contraste avec la nature du béton imprimé en 3D, qui présente souvent une viscosité élevée après extrusion et peut commencer à prendre rapidement. Par exemple, le mélange B avec 18 % d'eau a bouché l'entonnoir après seulement 10 minutes ([Figure 3c](#)). En raison de ces limitations, le mélange C n'a pas été testé afin d'éviter un gaspillage inutile de temps et de matériaux.

En résumé, bien que le test à l'entonnoir en V ait permis de différencier certains comportements parmi les mélanges à bonne fluidité, il est évident qu'il ne reflète pas fidèlement le comportement du mortier imprimé en 3D, qui est très différent des matériaux qui peuvent passer à travers l'entonnoir.

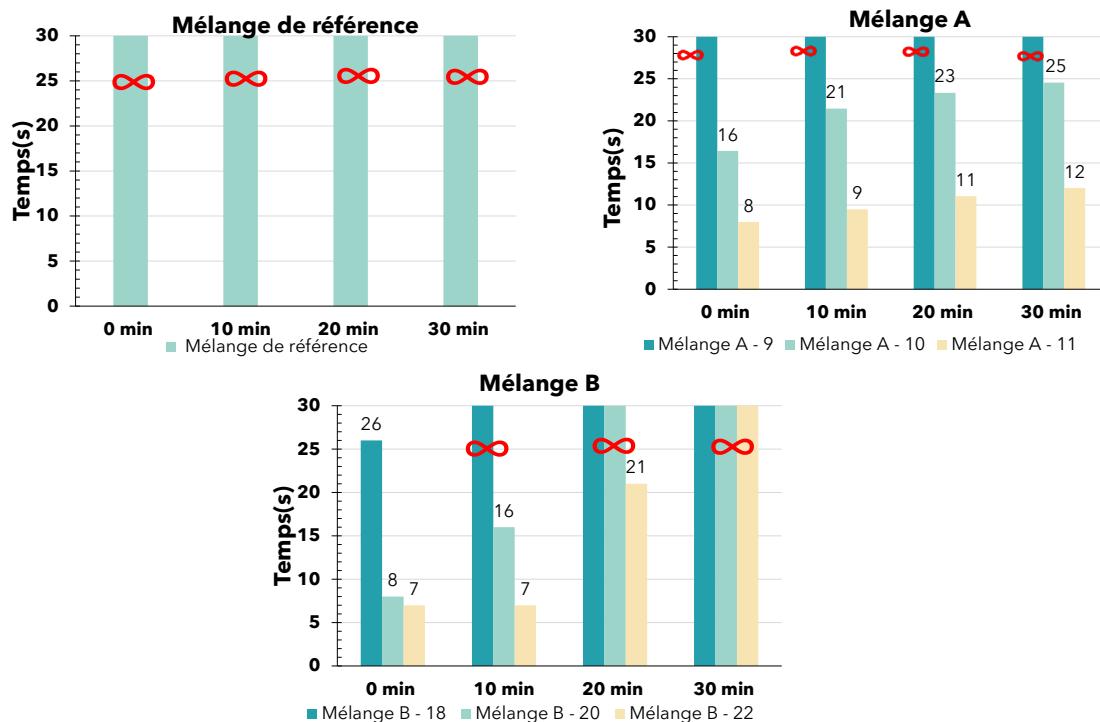


FIGURE 3. Les résultats de l'essai à l'entonnoir en V : (a) mélange de référence ; (b) mélange A avec 9, 10 et 11 % de teneur en eau ; (c) mélange B avec 18, 20 et 22 % de teneur en eau.

3. Essai au cône de chute

Le test au cône de chute est utilisé pour évaluer l'imprimabilité du mortier en mesurant la profondeur de pénétration du cône dans le matériau. Une plus grande profondeur indique une meilleure fluidité, tandis qu'une faible pénétration traduit une résistance accrue. La pénétration maximale possible est de 38 mm. Les résultats sont présentés dans la [Figure 4](#). Comme pour les tests précédents, les mesures ont été effectuées à 0, 10, 20 et 30 minutes après le malaxage afin de suivre l'évolution du comportement du matériau dans le temps. Pour le mélange de référence, la pénétration du cône était initialement très élevée, atteignant la valeur maximale de 38 mm à 0 et 10 minutes. Cette valeur a ensuite légèrement diminué à 30 mm à 20 minutes, puis à 23 mm à 30 minutes. La pénétration est restée proche ou supérieure à 70 % de la profondeur maximale, indiquant que le matériau offrait une faible résistance à la chute du cône. Ce comportement a également été observé pour la majorité des autres mélanges.

Dans le cas du mélange A ([Figure 4a](#)), le cône a atteint la pénétration maximale durant les 10 premières minutes. Pour l'échantillon contenant 9 % d'eau, la pénétration a ensuite diminué à 32 mm à 20 minutes, puis à 23 mm à 30 minutes. Les autres échantillons de cette série ont atteint la pénétration maximale à tous les intervalles de temps. Le mélange B ([Figure 4b](#)) a généralement montré une pénétration maximale de 38 mm, à l'exception de l'échantillon avec 18 % d'eau mesuré à 30 minutes, pour lequel la profondeur est tombée à 16 mm, révélant un changement notable de consistance.

À l'inverse, le mélange C a présenté une résistance nettement plus élevée à la pénétration par rapport aux deux mélanges précédents. Une pénétration maximale n'a été observée qu'avec le taux d'eau le plus élevé, et uniquement à 0 minute après malaxage. L'échantillon contenant 7 % d'eau a montré une bonne résistance, avec des profondeurs de pénétration de seulement 25 mm, 13 mm et 7 mm à 10, 20 et 30 minutes respectivement. Les mélanges à teneur en eau plus élevée ont, quant à eux, conservé des valeurs de pénétration élevées ([Figure 4c](#)), indiquant une fluidité accrue.

Les résultats expérimentaux ont révélé que le poids de la pointe du cône était disproportionnellement élevé par rapport à la capacité de résistance du matériau. En conséquence, le cône s'enfonçait systématiquement au fond de l'échantillon, ce qui empêchait d'observer les changements de comportement du matériau aux premiers instants. En raison de cette limitation, l'essai au cône de chute s'est avéré inefficace pour évaluer les propriétés rhéologiques du mortier imprimé, le rendant inadapté à ce type de matériau.

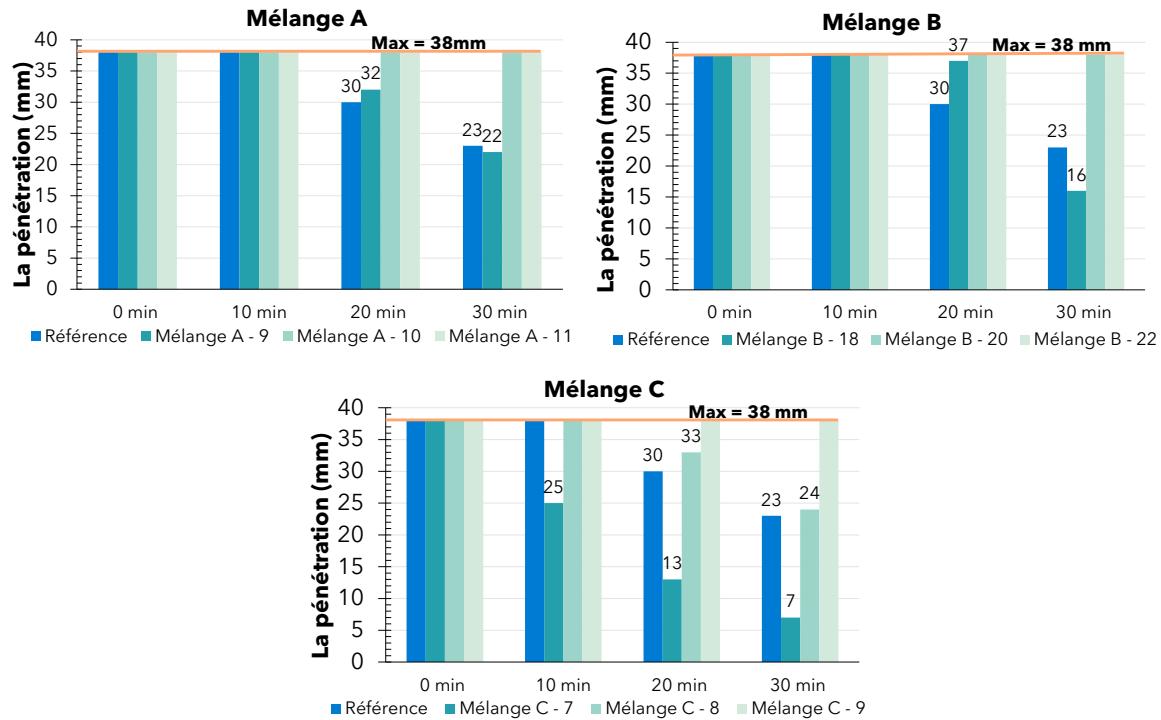


FIGURE 4. Les résultats de l'essai au cône de chute : (a) mélange A avec 9, 10 et 11 % de teneur en eau ; (b) mélange B avec 18, 20 et 22 % de teneur en eau ; (c) mélange C avec 7, 8 et 9 % de teneur en eau.

4. Test au pistolet

La technologie d'impression tridimensionnelle repose sur la fabrication additive, et l'un des moyens les plus pertinents pour évaluer l'imprimabilité des échantillons semble être le test au pistolet. Bien que cette méthode soit encore récente et dépourvue de normes officielles, certaines études ont proposé des critères clés pour son évaluation (Panda et al., 2019; Roussel, 2018) :

- Extrudabilité : Capacité à produire un filament imprimé continu ;
- Pompabilité : Capacité à circuler efficacement dans le système de pompage ;
- Constructibilité : Capacité à superposer plusieurs couches sans déformation.

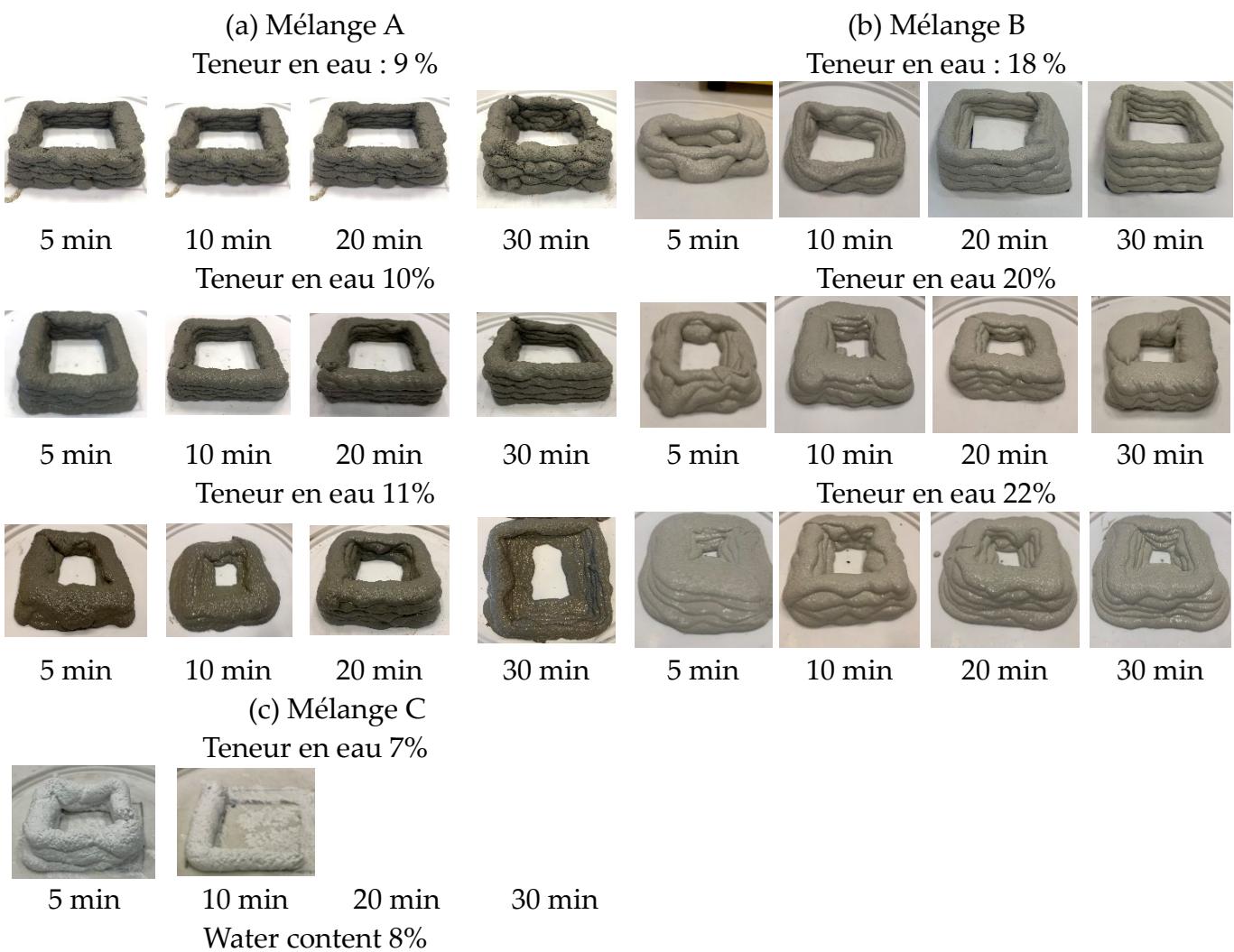
Ce test a été réalisé à 0, 10, 20 et 30 minutes après le malaxage afin d'observer l'évolution des propriétés du mortier dans le temps.

Concernant le mélange A, la formulation contenant 10 % d'eau a présenté les meilleures performances d'impression parmi les variantes testées (Figure 5a). Ce matériau a montré une excellente extrudabilité, conservant ses propriétés jusqu'à 30 minutes après le malaxage, de façon similaire à celles observées à 5 minutes. Il a également démontré une très bonne constructibilité, permettant la superposition de plus de cinq couches sans déformation. En revanche, toute variation de la teneur en eau rendait le matériau soit trop sec, soit trop fluide, ce qui souligne sa forte sensibilité à ce paramètre, en accord avec les résultats du test d'étalement.

Pour le produit commercial, soit le mélange B (Figure 5b), les meilleures performances d'impression ont été observées avec une teneur en eau de 18 %, notamment à 20 et 30 minutes

après le malaxage. Bien que l'extrudabilité et la pompabilité aient été satisfaisantes dès le départ, le matériau était initialement trop liquide pour permettre une bonne superposition des couches. Avec 20 % d'eau, le matériau s'est d'abord révélé inadapté à l'impression, mais ses propriétés se sont améliorées avec le temps, permettant l'obtention de lignes continues et régulières, ainsi qu'une bonne constructibilité. En revanche, à 22 % d'eau, le matériau était excessivement fluide, ce qui compromettait la stabilité des couches imprimées, entraînant leur affaissement.

Enfin, le mélange C a montré des performances limitées dans le cadre de cet essai. Les formulations contenant 7 % (impossible à imprimer après 20 minutes – [Figure 5c](#)) et 9 % d'eau ne répondaient pas aux exigences minimales pour l'extrusion et la constructibilité. Une teneur en eau de 8 % s'est révélée plus adaptée. Ce mélange présentait une bonne capacité d'extrusion, garantissant un débit régulier pendant l'impression. Cependant, sa constructibilité restait inférieure à celle du mélange B. Les lignes imprimées avec ce mélange étaient relativement épaisses et instables, ce qui rendait difficile l'empilement fiable de plusieurs couches ([Figure 5c](#)).



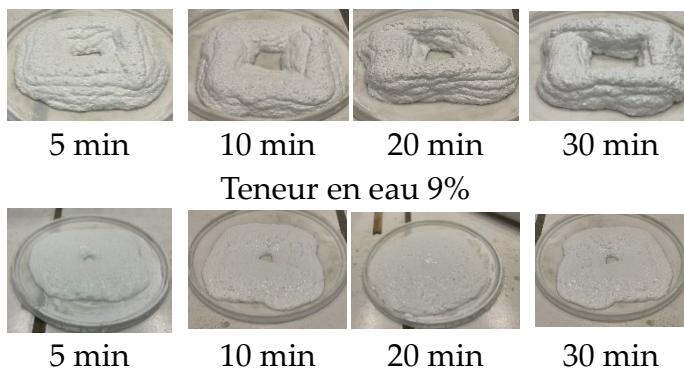


FIGURE 5. Résultats de l'essai au pistolet : (a) mélange A avec 9–10–11 % de teneur en eau ; (b) mélange B avec 18–20–22 % de teneur en eau ; (c) mélange C avec 7–8–9 % de teneur en eau.

IV. Conclusion

Les résultats de ces expériences montrent que le test de table de secousse et le test au pistolet évaluent efficacement la qualité du mortier imprimé en 3D. La table de secousse a permis de suivre avec succès le comportement du matériau à différents intervalles de temps. Le test au pistolet s'est révélé crucial car il évalue trois propriétés matérielles essentielles : la pompabilité, l'extrudabilité et la constructibilité.

Cependant, le test à l'entonnoir en V et le test au cône de chute se sont avérés inadaptés dans cette étude. Le test à l'entonnoir en V s'est montré inefficace pour des mortiers ayant une contrainte de seuil plus élevée que celle du mortier autocompactant, où le matériau ne pouvait pas sortir de l'entonnoir. De même, bien que des études précédentes (Rehman et al., 2024b) suggèrent que le test au cône de chute convient au mortier imprimé en 3D, il n'a pas donné de résultats probants ici. La pénétration du cône était trop profonde par rapport à la résistance du matériau, rendant difficile l'évaluation de son imprimabilité à un stade initial.

Il est important de souligner que l'inadaptation du test à l'entonnoir en V et du test au cône de chute dans cette étude ne signifie pas que ces méthodes soient entièrement inappropriées pour le béton imprimé en 3D. Leur pertinence dépend des propriétés spécifiques de chaque matériau et de la conception des appareils de test. Par exemple, dans l'étude de Pham et al. (Pham et al., 2022), la fluidité du matériau imprimé était nettement meilleure que dans d'autres recherches. De même, dans l'étude de Rehman et al. (Rehman et al., 2024b), le test au cône de chute s'est avéré très adapté, en raison d'une contrainte de seuil relativement élevée du matériau, autour de 1 à 2 kPa. De plus, cette étude utilisait un équipement avancé, permettant des mesures précises et la prise en compte directe de paramètres tels que la contrainte de seuil au cisaillement, la force et la pénétration du cône.

REFERENCES

- De Schutter, G., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V.N., Habert, G., Agusti-Juan, I., 2018. Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials. *Cem. Concr. Res.* 112, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>
- Gosselin, C., Duballet, R., Roux, Ph., Gaudilli  re, N., Dirrenberger, J., Morel, Ph., 2016. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. *Mater. Des.* 100, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>
- Kulichikhin, V.G., Malkin, A.Ya., 2022. The Role of Structure in Polymer Rheology: Review. *Polymers* 14, 1262. <https://doi.org/10.3390/polym14061262>
- 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. *Mater. Struct.* 45, 1221–1232. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
- Li, W., Lin, X., Bao, D.W., Min Xie, Y., 2022. A review of formwork systems for modern concrete construction. *Structures* 38, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.089>
- Panda, B., Noor Mohamed, N.A., Paul, S.C., Bhagath Singh, G., Tan, M.J.,   avija, B., 2019. The Effect of Material Fresh Properties and Process Parameters on Buildability and Interlayer Adhesion of 3D Printed Concrete. *Materials* 12, 2149. <https://doi.org/10.3390/ma12132149>
- Pham, T.L., Zhuang, X.J., Nguyen, T.H.T., Department of Structural Engineering, Tongji University, PR China, Department Of Structural Engineering, Tongji University, Pr China, Department of Civil Engineering, Haiphong University, Vietnam, Nguyen, P.A., Department of Civil Engineering, Haiphong University, Vietnam, Trinh, D.T., Department of Civil Engineering, Haiphong University, Vietnam, 2022. Experimental investigations on the rheological properties of the proposed 3D printing mortar. *Minist. Sci. Technol. Vietnam* 64, 50–53. [https://doi.org/10.31276/VJSTE.64\(2\).50-53](https://doi.org/10.31276/VJSTE.64(2).50-53)
- Rehman, A.U., Basha, S.I., Choi, K., Kang, M., Kim, J.-H., 2024a. An Analysis of Penetrometer Test Methods for Structural Build-Up in Stiff and Accelerated 3D Concrete Printing Mixtures, in: Tan, M.J., Li, M., Tay, Y.W.D., Wong, T.N., Bartolo, P. (Eds.), *Construction 3D Printing*, Springer Tracts in Additive Manufacturing. Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 113–123. https://doi.org/10.1007/978-3-031-64269-2_15
- Rehman, A.U., Kim, I.-G., Kim, J.-H., 2024b. Towards full automation in 3D concrete printing construction: Development of an automated and inline sensor-printer integrated instrument for in-situ assessment of structural build-up and quality of concrete. *Dev. Built Environ.* 17, 100344. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100344>
- Roussel, N., 2018. Rheological requirements for printable concretes. *Cem. Concr. Res.* 112, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.005>
- Rubio, M., Sonebi, M., Amziane, S., 2015. 3D PRINTING OF FIBRE CEMENT-BASED MATERIALS: FRESH AND RHEOLOGICAL PERFORMANCES.

Siddika, A., Mamun, Md.A.A., Ferdous, W., Saha, A.K., Alyousef, R., 2020. 3D-printed concrete: applications, performance, and challenges. *J. Sustain. Cem.-Based Mater.* 9, 127–164. <https://doi.org/10.1080/21650373.2019.1705199>

Solodziuk, B., 2023. 10 houses 3D printed in 10 weeks | COBOD International. COBOD. URL <https://cobod.com/10-houses-3d-printed-in-10-weeks-on-the-largest-3d-printing-project-site/> (accessed 6.2.25).

Stojkov, G., Niyazov, Z., Picchioni, F., Bose, R.K., 2021. Relationship between Structure and Rheology of Hydrogels for Various Applications. *Gels* 7, 255. <https://doi.org/10.3390/gels7040255>

Tarhan, Y., Şahin, R., 2021. Fresh and Rheological Performances of Air-Entrained 3D Printable Mortars. *Materials* 14, 2409. <https://doi.org/10.3390/ma14092409>

Ungureanu, D., Onuțu, C., Țăranu, N., Vornicu, N., Zghibarcea, Ștefan V., Ghiga, D.A., Spiridon, I.A., 2023. Microstructure and Mechanical Properties of Cost-Efficient 3D Printed Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers. *Buildings* 13, 2813. <https://doi.org/10.3390/buildings13112813>

Wang, Y., Aslani, F., Dyskin, A., Pasternak, E., 2023. Digital Twin Applications in 3D Concrete Printing. *Sustainability* 15, 2124. <https://doi.org/10.3390/su15032124>

Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X., Han, B., 2019. A review of the current progress and application of 3D printed concrete. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 125, 105533. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105533>

Zhang, Yu, Zhang, Yunsheng, Liu, G., Yang, Y., Wu, M., Pang, B., 2018. Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink. *Constr. Build. Mater.* 174, 263–271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.115>