



**HAL**  
open science

# Méthode de caractérisation de la déformation d'un matériau cimentaire à l'état frais basée sur la Corrélation d'Images Numériques

Yohan Jacquet, Vientent Picandet, Arnaud Perrot

## ► To cite this version:

Yohan Jacquet, Vientent Picandet, Arnaud Perrot. Méthode de caractérisation de la déformation d'un matériau cimentaire à l'état frais basée sur la Corrélation d'Images Numériques. 25e Congrès Français de Mécanique,, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280180

**HAL Id: hal-04280180**

**<https://hal.science/hal-04280180>**

Submitted on 10 Nov 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Méthode de caractérisation de la déformation d'un matériau cimentaire à l'état frais basée sur la Corrélation d'Images Numériques – Application à différentes sollicitations mécaniques

Y. JACQUET<sup>a</sup>, V. PICANDET<sup>a</sup>, A. PERROT<sup>a</sup>

a. Université Bretagne Sud – 56100 Lorient  
yohan.jacquet@univ-ubs.fr

**Mots clés :** Impression 3D, rhéologie, béton, corrélation d'images numériques, grandes déformations.

**Résumé :** Depuis plusieurs années maintenant, la fabrication additive par impression 3D prend une ampleur considérable et peut être aujourd'hui considérée dans certains domaines de l'industrie comme un procédé de mise en œuvre courant. Le domaine de la construction n'échappe pas à cette règle mais subit un important retard de développement. Outre l'impact sociétal induit par l'automatisation, la transition tardive vers ces nouveaux procédés de mise en œuvre peut être aussi attribuée à l'échelle des objets à produire, mais non seulement à la complexité des matériaux utilisés en génie civil. Il s'agit en effet de suspensions granulaires présentant une haute concentration de particules, elles-mêmes présentant une forte variabilité de tailles et de formes. A ces aspects purement granulaires s'ajoute la nécessité d'adapter le matériau au procédé de mise en forme : ce type de fluide peut présenter de très fortes non-linéarités de comportement dans des plages d'utilisation courantes.

Pour répondre aux besoins liés au coulage des bétons (procédé usuel de construction), de nombreuses problématiques liées à la caractérisation du matériau en cisaillement ont déjà été explorées. Cependant, l'impression 3D nécessite une compréhension approfondie du comportement sous sollicitation élongationnelle ou complexe, en particulier pour les matériaux à haute limite d'élasticité déposés selon une stratégie dite « de la brique infinie ». La nécessité de caractériser finement la déformation de tels matériaux nécessite de combiner avantageusement les méthodes expérimentales issues de la rhéologie fluide et de la mécanique solide.

Une des grandeurs caractéristiques rencontrée en rhéologie des fluides est la viscosité or, la définition de celle-ci nécessite de connaître avec précision le taux de déformation du matériau sollicité. Cette étude propose de se concentrer sur la définition de cette déformation du matériau frais sous une contrainte de cisaillement, de compression et de traction. En effet, afin de satisfaire l'intégrité dimensionnelle de la structure imprimée, il est crucial de maintenir ces contraintes sous des valeurs critiques afin d'éviter d'éventuels problèmes d'impression et de fissuration du filament (faible rayon de courbure le long du chemin d'impression, flexion induite par le dépôt...). Compte tenu de l'incapacité de la plupart des matériaux imprimables fermes à se déformer sans se fissurer, ce travail propose de surveiller la déformation du matériau à l'aide de la Corrélation d'Images Numériques (DIC) sous différents cas de charge. Une telle étude est nécessaire pour décrire précisément le comportement élasto-visco-plastique du matériau soumis à de grandes déformations. Une comparaison de la

déformation calculée et de la déformation obtenue par DIC est proposée et la limite de validité des hypothèses communément utilisées pour l'interprétation des données d'essais sera discutée. Ce type de matériau à seuil au comportement souvent fortement non linéaire répond à des modèles rhéologiques à plusieurs paramètres, tel que celui proposé par Herschel Bulkley (1926) : une méthode d'extrapolation d'un des paramètres d'écoulement de cette loi sera proposée. Enfin, l'effet des adjuvants modificateurs de viscosité (VMA) sur la déformation critique sera étudié.

Le prérequis à une industrialisation forte de l'impression 3D réside dans la capacité à maîtriser la formulation du matériau afin de satisfaire aux exigences liées au procédé, à la stabilité structurelle et à la durabilité des matériaux imprimés. L'augmentation de la capacité du matériau à se déformer avant rupture permet de prédire la faisabilité et la durabilité des matériaux imprimés. Cependant, la caractérisation de la déformation de ce type de matériau au comportement complexe reste à l'heure actuelle un enjeu majeur. Cette étude propose une méthode permettant de valider ou de déterminer les paramètres rhéologiques et mécaniques de tout type de matériaux à seuil utilisables dans le domaine du génie civil, et soumis à tout type de sollicitations mécaniques (traction, compression et cisaillement).

**Abstract :** 3D concrete printing sparks over the past few years the interest of researchers invested in concrete Digital Fabrication and can today be considered in certain areas of industry as a common building process. The construction sector is no exception to this trend but suffers from a significant delay in development. In addition to the societal impact induced by automation, the late transition to these new processes can also be assigned to the scale of the objects to be produced, but also to the complexity of the materials used in civil engineering. They are indeed granular suspensions having a high concentration of particles, themselves having a strong variation of size and shape. In addition to these purely granular aspects, there is a significant need to adapt the material to the shaping process: this type of fluid can present very strong non-linearities of behavior in common ranges of use.

To meet the requirements related to casting of concrete (a common construction process), many issues related to the characterization of the material submitted to shear stress have already been explored. However, 3D printing requires a deeper understanding of the behavior when elongational or complex solicitations occur, especially for materials with high yield strength deposited according to a so-called "infinite brick" strategy. To accurately assess the deformation of such materials, we need to combine experimental methods from fluid rheology and solid mechanics.

One of the feature values encountered in the rheology of fluids is the viscosity but the definition of this one requires to accurately determine the rate of deformation. This study proposes to focus on the definition of this deformation of the fresh material under shear, compression and tensile stresses. To satisfy the dimensional integrity of the printed structure, it is crucial to maintain these stresses values under critical ones in order to limit occurrence of issues due to printing and cracking of the filament (small radius of curvature along the printing path, deposition-induced bending...). Considering the inability of most firm printable materials to be deformed without cracking, this work proposes to monitor material deformation using Digital Image Correlation (DIC) under different load cases. Such a study is necessary to accurately describe the elasto-visco-plastic behavior of the material subjected to large deformations. A comparison of the computed strains and the strain obtained by DIC is proposed and the limit of validity of the assumptions commonly used for the interpretation of testing data will be discussed. This type of yield material with often highly nonlinear behavior responds to rheological models with several parameters, such as that proposed by Herschel Bulkley (1926): a method for extrapolating one of the flow parameters of this law will be proposed. Finally, the effect of viscosity modifying admixtures (VMA) on the critical deformation will be studied.

*The prerequisite for a strong industrialization of 3D printing lies in the ability to control the mix design of the material in order to meet the requirements related to the process, the structural stability and the durability of the printed materials. The increase in the ability of the material to be deformed before failure predicts the feasibility and durability of printed materials. However, the characterization of the deformation of this type of material that exhibit a complex behavior remains at present a huge challenge. This study proposes a method to assess rheological and mechanical parameters of any type of high yield materials usually encountered in the field of civil engineering, and under different mechanical load cases (tension, compression, and shear).*

## 1 Introduction

Parmi toutes les technologies d'impression 3D, la méthode de fabrication additive par extrusion reste de loin la plus courante. On peut distinguer deux approches majeures : la première consiste à imprimer du matériau déjà rigide depuis le mélange jusqu'à l'extrusion à travers la filière, tandis que la seconde est basée sur l'emploi de matériaux fluides pour faciliter le pompage dans lequel un accélérateur de prise est injecté au niveau de la buse de l'imprimante pour accélérer la rigidification du matériau après son dépôt [1]. Par rapport au coulage, l'impression 3D nécessite plus de travaux de caractérisation des propriétés à l'état frais, en particulier celles liées aux contributions visqueuses lors du pompage, de l'extrusion et du dépôt [2]. Le plus grand défi technologique réside dans la capacité à développer le matériau conformément aux spécifications techniques de l'imprimante utilisée pour la mise en forme (pompage, mélange en ligne, capacités de l'extrudeuse à vis). D'un point de vue industriel, une solution couplée matériel/automatisation pourrait être envisagée mais une approche plus large permettant un choix d'automatisation en fonction de paramètres matériaux permet d'ouvrir la voie vers plus de robustesse et d'interopérabilité.

L'utilisation d'agents de modification de la viscosité (VMA) constitue encore un moyen courant d'atteindre les propriétés à l'état frais requises par un matériau imprimable. Cependant, la viscosité des matériaux fermes reste difficile à caractériser avec les méthodes de rhéologie classique. Alors que l'étape d'extrusion met principalement l'accent sur le rôle du comportement en cisaillement, l'étape de dépôt met en jeu des phénomènes beaucoup plus complexes liés à la flexion du matériau (une combinaison de charges de traction et de compression) et la stabilité de la structure en cours d'impression fait inévitablement intervenir des efforts de compression [3]. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour décrire les propriétés rhéologiques ou les propriétés à la rupture, mais toutes surestiment la déformation réelle du matériau en raison des grandes déformations mises en jeu, en particulier pour les plus fermes d'entre eux. La définition précise de la viscosité nécessite de déterminer la valeur de la déformation – et par extension la vitesse de déformation – la plus proche de la réalité. La complexité liée à la caractérisation de la viscosité et à des charges mécaniques multiples conduit à envisager de nouvelles approches pour évaluer la déformation des matériaux. L'approche présentée dans cette étude vise à donner une méthode de détermination de ces paramètres par Corrélation d'Images Numériques (DIC) en compression, en traction et en cisaillement.

## 2 Matériaux et méthodes

### 2.1 Matériaux

Le mélange utilisé dans cette étude comprend du ciment Portland ordinaire CEM I 52.5, de l'eau (E), un adjuvant haut réducteur d'eau à base de polycarboxylate (HRWRA) et de l'hydroxypropylméthylcellulose (HPMC) comme agent modificateur de viscosité (viscosité typique de 10 000 mPa.s). Les dosages en adjuvants des deux mélanges suivent les ratios HRWRA/C = 1,5 % et HPMC/E = 0,68 %. Les mélanges étudiés dans cette étude ont été dosés selon un rapport eau sur ciment (E/C) compris entre 0,28 et 0,38.

### 2.2 Méthodes

Trois dispositifs d'essai différents ont été développés : le premier pour l'essai de traction (Fig. 1a), le second pour l'essai de compression (Fig. 1b) et le dernier pour l'essai de cisaillement (Fig. 1c). L'un de ces dispositifs est représenté déjà monté sur la machine d'essai (banc de translation linéaire). Tous les prototypes sont imprimés en 3D à l'aide de PETG et composés de quatre pièces différentes : deux supports fixes et de deux moules interchangeables. La partie droite de chaque appareil est fixe tandis que la seconde est pilotée en déplacement à l'aide d'un moteur pas à pas. Pour localiser la déformation du matériau, les dispositifs d'essai de traction et de cisaillement sont respectivement nervurés et rendu rugueux.

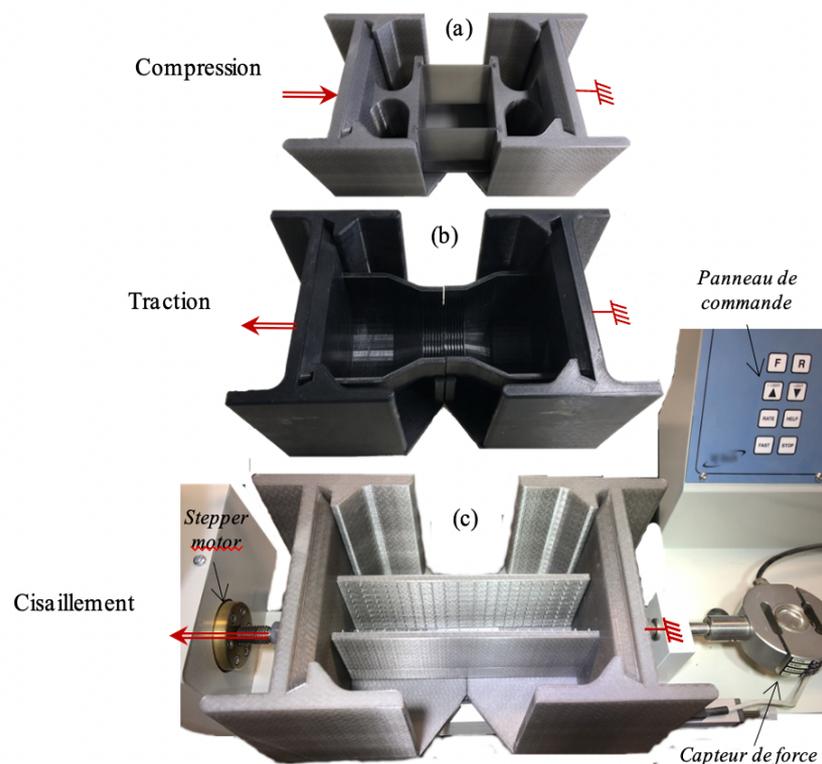


Fig. 1 Dispositifs de compression (a), traction (b) et cisaillement (c), composés respectivement de deux parties fixes et deux parties amovibles.

Cette machine permet de contrôler la vitesse de déplacement définie égale à 0.1mm/s. Une cellule de charge 500N est utilisée pour mesurer et tracer la force normale en fonction du déplacement horizontal. Le déplacement imposé est destiné à être comparé à celui mesuré par DIC. Sur la base de ces deux valeurs de déplacement, la déformation de Cauchy  $e$ , la déformation de Hencky  $\varepsilon$  (parfois appelée « vraie déformation ») et la déformation calculée par DIC peuvent être comparées. Ces différentes valeurs de déformation sont déterminées sur la base de l'Équation (1).

$$\varepsilon = \ln(e + 1) \text{ avec } e = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

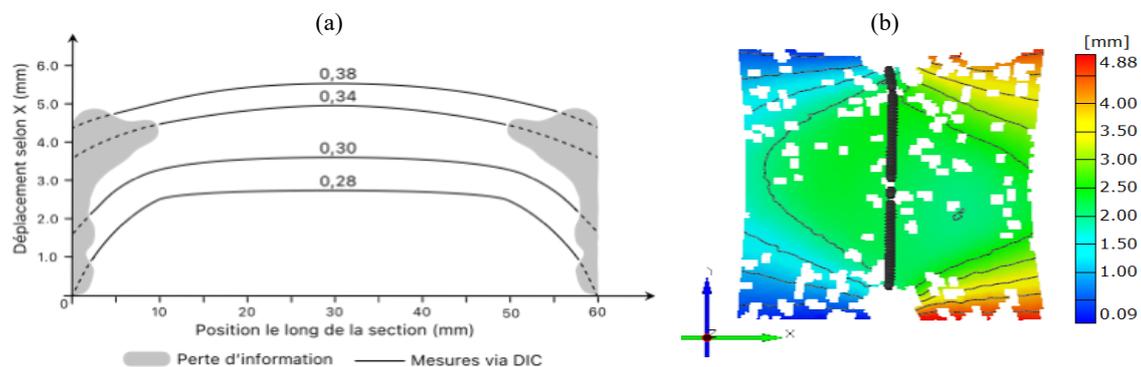
Dans cette étude, chaque cas de charge sera mentionné et discuté mais une attention particulière sera apportée à la traction en raison de son impact sur l'ouverture des fissures et de son influence sur la validité des critères de plasticité symétriques pour les matériaux fermes (critère de Von Mises par exemple) [4].

Dans le but d'évaluer la déformation du matériau à l'aide de la corrélation d'images numériques, la surface extérieure de l'échantillon est généralement peinte et mouchetée de différentes couleurs afin de maximiser le contraste. Dans le cas du béton frais, la méthode doit être adaptée : pour assurer le contraste à la surface du ciment gris foncé, des granulats de verre expansé blancs vifs de 0,1 à 0,3 mm de diamètre sont utilisés afin de moucheter le dessus de l'échantillon (ces particules présentent une densité de 800kg/m<sup>3</sup> – DIN V 18004, ce qui assurent qu'il reste bien en surface). Grâce à un système de mesure optique (Aramis, société GOM Correlate) équipé de deux objectifs de focal 35 mm positionnés entre 50 et 60 cm au-dessus de la surface de l'échantillon, le déplacement de chaque bille de verre expansé peut être suivi à une fréquence d'acquisition de 1 Hz, et la déformation peut ainsi être quantifiée. Une calibration 3D du système de corrélation d'images numérique est réalisée afin de capturer la déformation hors-plan, ce qui est particulièrement intéressant pour les matériaux les plus fluides qui sont susceptibles de présenter un léger affaissement induit par la gravité.

### 3 Résultats et discussion

#### 3.1 Mesure du déplacement et traitement des résultats

Dans cette partie de l'étude, seuls les aspects liés à l'essai de traction sont présentés afin de mettre en évidence les possibilités offertes par la méthode de corrélation numérique d'images. La Fig. 2a présente les champs de déplacement obtenus à l'aide de la DIC le long d'une section (Fig. 2b). Selon le rapport E/C, un écoulement « bouchon » peut être observé au centre de la section et sa longueur peut être calculée. Cette méthode trouve ses limites dans la perte locale de données induite par la rupture du matériau et la disparition résultante de billes de verre expansées interdisant le calcul de la déformation locale.



**Fig. 2.** (a) Mesure du déplacement le long d'une section dans le cas d'un matériaux soumis à un effort de traction pour différents rapports E/C (b) Iso-valeurs de déplacement obtenues à la rupture en traction en utilisant la corrélation d'images numériques.

Sur la base de l'équation de distribution de vitesse pour un écoulement de fluide en loi puissance dans une conduite (Coulson et Richardson 1999), certains paramètres (sans unité) de fluides non-newtoniens peuvent être déterminés (par exemple, l'indice  $n$  du modèle de Herschel Bulkley). Compte tenu de la géométrie du dispositif de traction (rayon  $R = 40$  mm), l'équation peut être extrapolée au déplacement  $u_x$  le long de la section tracée grâce au logiciel de DIC (Fig. 1) par rapport au déplacement moyen  $u$  suivant l'Équation. (2).

$$\frac{u_x}{u} \propto \left( \frac{3n+1}{n+1} \right) \left\{ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{(n+1)/n} \right\} \quad (2)$$

Un tel calcul permet de déterminer  $n$ , ici entre 0,6 à 1 pour un rapport E/C compris entre 0,28 et 0,38.

Table 1 Mesures de déplacement et calcul de la déformation associée

	Ratio E/C	Déplacement imposé	Déplacement mesuré (DIC)	Déformation de l'ingénieur	Déformation de Hencky	Déformation par DIC
Traction	0,28	5.4 mm	2.4 mm	9.0 %	8.62 %	4.00 %
	0,30	7.5 mm	3.65 mm	12.5 %	11.78 %	6.08 %
	0,34	9.5 mm	4,8 mm	15.83 %	14.70 %	8.00 %
	0,38	10.9 mm	5.6 mm	18.17 %	16.69 %	9.33 %
Compression	0,30	13.4 mm	6.5 mm	16.75 %	15.49 %	8.13 %
Traction	0,30	7.5 mm	3.65 mm	12.50 %	11.78 %	6.08 %
Cisaillement	0,30	13.6 mm	9.3 mm	35.79 %	30.59 %	24.47 %

### 3.2 Influence des propriétés rhéologiques et du cas de chargement sur la déformation du matériau

Selon la manière dont le matériau est mis en forme, les exigences rhéologiques peuvent varier considérablement. Le béton frais peut être considéré comme un matériau hautement déformable et la déformation – même en considérant une déformation vraie en élongation – est souvent sous-estimée. Cet écart dans les valeurs de déformation est d'autant plus important que la rigidité du matériau augmente (c'est-à-dire que le rapport  $E/C$  diminue). Sur la base des déplacements résumés dans le Tableau 1, une comparaison entre la déformation de Cauchy  $e$ , la déformation réelle  $\varepsilon$  et la déformation basée sur les mesures DIC est proposée (Fig. 3). Cette pâte imprimable présente une viscosité très élevée en raison de la teneur fixée en HPMC dans la formulation, la déformation imposée et calculée peut atteindre respectivement 18% et 9%.

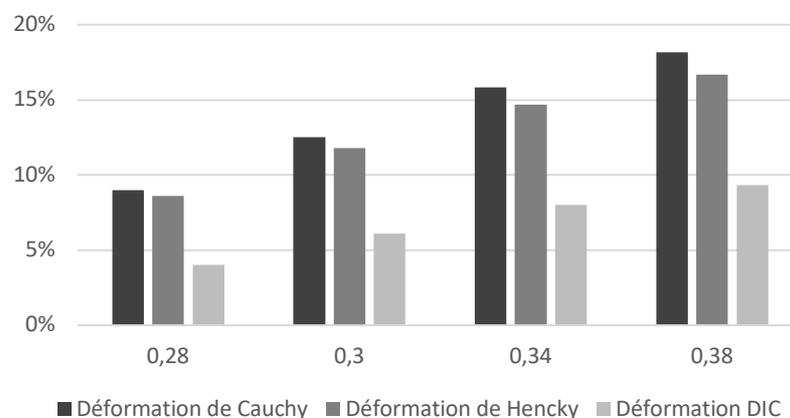


Fig. 3 Influence du rapport  $E/C$  sur la déformation admissible à la rupture du matériau

L'objectif de cette étude est de présenter une procédure permettant de favoriser la reproductibilité, c'est pour cette raison que les matériaux testés ont été choisis suffisamment fermes. La méthode peut être adaptée aux matériaux les plus fluides (convergeant vers un critère de plasticité de Von Mises) en entourant le matériau cimentaire d'un fluide non-miscible tel qu'un carbomère. La procédure d'essai peut facilement être adaptée à différents cas de charge mécanique : la compression, la traction et le cisaillement plan-plan (Fig. 4). Ces trois configurations montrent que la différence entre le déplacement imposé et le déplacement effectif calculé par DIC est du même ordre de grandeur que pour l'essai de traction mais un peu plus proche concernant l'essai de cisaillement sur la pâte de ciment.

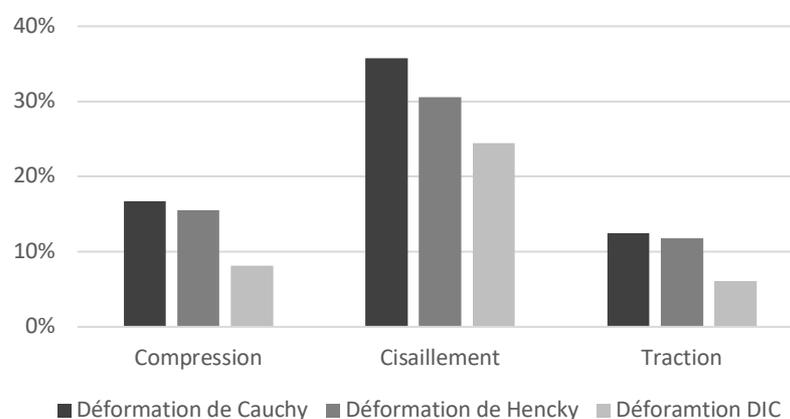


Fig. 4 Déformations admissibles pour différents cas de charge (compression, traction, cisaillement)

## 4 Conclusion et perspectives

L'un des principaux défis de l'impression 3D de béton est de définir avec précision le comportement du matériau lorsqu'il est soumis à des sollicitations complexes. Une campagne de mesures rhéologiques peut être envisagée à cet effet, mais des hypothèses importantes sont souvent formulées avec les méthodes rhéométriques traditionnelles. Une autre possibilité moins conventionnelle consiste à suivre la déformation du profil d'écoulement du matériau afin de remonter à ses valeurs rhéologiques. La corrélation d'images numériques sur des matériaux cimentaires frais ouvre la porte à des évaluations alliant rhéologie et mécanique. La présente étude vise à mettre en évidence les principales possibilités et limites offertes par cette méthode, sous différents cas de chargement (compression, traction et cisaillement), et à comparer les approximations usuellement employées en grandes déformations avec une déformation calculée à l'aide de la DIC.

## 5 Références

1. Mechtcherine V, Bos FP, Perrot A, et al (2020) Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review. *Cement and Concrete Research* 132:106037.
2. Perrot A, Pierre A, Nerella VN, et al (2021) From analytical methods to numerical simulations: A process engineering toolbox for 3D concrete printing. *Cement and Concrete Composites* 122:104164
3. Jacquet Y, Picandet V, Rangeard D, Perrot A (2020) Gravity induced flow to characterize rheological properties of printable cement-based materials. *RILEM Technical Letters* 5:150–156
4. Jacquet Y, Perrot A, Picandet V (2021) Assessment of asymmetrical rheological behavior of cementitious material for 3D printing application. *Cement and Concrete Research* 140:106305.