

Développement d'éco-matériaux compatibles avec l'impression 3D pour la fabrication de récifs artificiels

GEORGES Valentin¹, AUDO Mariane², SEBAIBI Nassim¹, BOUTOUIL Mohamed¹

¹ : COMUE Normandie Université – Laboratoire ESITC, ESITC Caen, 1, Rue Pierre et Marie Curie, 14610 EPRON. valentin.georges@esitc-caen.fr; nassim.sebaibi@esitc-caen.fr; mohamed.boutouil@esitc-caen.fr

² : COMUE Normandie Université – Laboratoire ESITC, ESITC Paris, 79, Avenue Aristide Briand, 94110 ARCUEIL. audo@esitc-paris.fr

RÉSUMÉ. La technologie d'impression 3D de matériaux cimentaires est une technologie disruptive qui peut révolutionner le mode de construction dans le domaine du génie civil. Cette technologie ouvre également de nouveaux horizons pour la conception et la construction de récifs artificiels. Dans ce cadre, les formulations développées doivent répondre à différents critères : elles doivent être compatibles avec la technologie d'impression 3D par extrusion (pompeabilité, extrudabilité, constructibilité), présenter l'empreinte carbone minimale et favoriser la colonisation biologique. Les formulations développées sont composées d'un mélange de ciment sulfo-alumineux et d'un ciment Portland (CEM III A), et de différents ratios sable calcaire/sable coquillé (coquille Saint-Jacques). L'incorporation de ciment sulfo-alumineux et de sable coquillé a une influence marquée sur les propriétés à l'état frais des matériaux. La perte de maniabilité liée à ces substitutions est ainsi compensée par l'utilisation d'un superplastifiant. L'utilisation de ciment sulfo-alumineux permet d'améliorer la capacité portante des matériaux, ainsi que leurs résistances à court terme.

ABSTRACT. Cementitious materials 3D printing technology is a disruptive technology that can revolutionize the way construction is done in the field of civil engineering. This technology brings new horizons for the design and construction of artificial reefs. The formulations developed must meet various criteria: they must be compatible with 3D extrusion printing technology (pumpability, extrudability, constructability), have a minimum carbon footprint and promote biological colonization. The formulations developed are composed of a mixture of sulfo-aluminous cement and Portland cement (CEM III A), and different ratios of limestone sand to shell sand (scallop shell). The incorporation of sulfo-aluminous cement and shell sand has a significant influence on the fresh properties of the materials. The loss of manoeuvrability associated with these substitutions is thus compensated by the use of a superplasticizer. The use of sulfo-aluminous cement improves the load-bearing capacity of the materials and their short-term mechanical strength.

MOTS-CLÉS : Impression 3D, impression par extrusion, éco-matériaux, récifs artificiels.

KEY WORDS: 3D printing, concrete, extrusion printing, eco-materials, artificial reefs.

1. Introduction

Du fait de l'activité humaine, de l'augmentation de la température, de l'acidification des océans et de la récurrence d'événements météorologiques graves, de plus en plus de récifs naturels marins sont menacés, voire partiellement ou totalement détruits. Dans le but de remplacer et/ou de réparer les écosystèmes qui se développent au sein de ces récifs, de nombreuses immersions de récifs artificiels ont été menées en France et en Europe. Un récif artificiel peut être défini comme étant « une structure immergée volontairement, placée sur des fonds marins pour reproduire les fonctions d'un récif naturel telles que la protection, la régénération, la concentration ou l'augmentation des populations d'organismes marins ». Les matériaux utilisés pour les récifs artificiels doivent répondre à trois grands critères [LUK 04] :

- Compatibilité : les matériaux doivent être neutres vis-à-vis du milieu marin ;
- Durabilité : résistance aux attaques physico-chimiques induites par le milieu ;
- Stabilité : les éléments imprimés doivent résister aux événements météorologiques intenses.

Cette étude s'intègre dans cet objectif, en valorisant la technologie d'impression 3D par extrusion, pour la réalisation de formes complexes adaptées à la colonisation et au développement de la faune et flore aquatique.

L'un des enjeux de cette étude est de minimiser l'impact environnemental des matériaux utilisés en impression 3D, tout en conservant des propriétés de pompabilité, d'extrudabilité et de constructibilité nécessaires pour ce mode de fabrication, tout en assurant une bio-réceptivité maximale. Pour cela, les liants hydrauliques choisis dans cette étude sont réputés moins énergivores : un CEM III/A composé à 64% de laitier de haut fourneau (CEM III) et un ciment sulfo-alumineux (CSA). De même, les sables mis en œuvre dans les formulations sont un sable calcaire concassé (SC) et un sable bio-sourcé (sable de coquille Saint-Jacques (StJ)).

2. Méthodologie expérimentale

L'impression 3D de matériaux cimentaires par extrusion dépend principalement des propriétés de la formulation à l'état frais et au jeune âge. Plusieurs paramètres ont ainsi été suivis à l'état frais : la fluidité, l'extrudabilité et l'ouvrabilité [MA 17 ; KAZ 17].

2.1. Extrudabilité

L'extrudabilité est un critère décisif pour les formulations. Pour que la composition du mélange soit validée, ce dernier doit pouvoir passer la buse en continue, sans la boucher et former un extruda stable et sans fracture. Ici, l'extrusion est simulée avec un pistolet à mortier manuel.

2.2. Fluidité

Dans la plupart des cas, l'imprimante 3D par extrusion fonctionne avec un système de pompe qui transporte le mortier jusqu'à la tête d'impression. Pour cela, le matériau doit avoir des propriétés rhéologiques adaptées. Deux méthodes de caractérisations de la maniabilité sont utilisées :

- L'essai de pénétration de la sonde Vicat selon la norme EN 196-3, qui permet d'évaluer la consistance des formulations sous une contrainte ;
- L'essai d'affaissement au cône d'Abrams selon la norme NF EN 12350-2, qui permet d'évaluer la consistance du mortier sous son propre poids.

2.3. Hydratation et prise

Les formulations utilisées pour l'extrusion doivent avoir un temps d'ouvrabilité suffisamment long pour être pompées et extrudées, mais également un temps avant prise et durcissement suffisamment long pour ne pas bloquer le système. Pour valider ces critères et observer l'influence des différentes substitutions sur l'hydratation et la prise des différentes formulations, deux caractérisations sont réalisées :

- Le suivi de la chaleur d'hydratation avec un calorimètre semi-adiabatique ou calorimètre de Langavant (norme NF EN 196-9), permettant d'étudier les phénomènes de dissolution/précipitation, exothermiques, qui s'opèrent lors de l'hydratation des différents ciments ;
- La mesure du temps de début de prise et du temps de prise réalisée avec un prisomètre automatique, adapté de la norme NF EN 196-3.

3. Formulations d'étude

Les formulations présentées dans le Tableau 1 ont été optimisées et répondent au critère d'extrudabilité. La formule de référence (C3) est composée de ciment CEM III/A 52,5 et de sable calcaire concassé 0-1 mm. À partir de cette formulation, différentes substitutions de ciment et/ou de sable sont réalisées. Le rapport E/C est maintenu le plus bas possible et la consistance est ajustée par ajout de super-plastifiant.

Tableau 1. Formules optimisées pour l'impression 3D

Réf	Ciment		Sable 0-1		E/C	Super-plastifiant
	CEM III	CSA	SC	StJ		
C3	100%	-	100%	-	0,50	0,8%
C3S	70%	30%	100%	-	0,50	0,8%
J4	100%	-	75%	25%	0,54	0,9%
J4S	70%	30%	75%	25%	0,54	0,9%

4. Consistance

La consistance est un paramètre important pour l'impression 3D par extrusion. Le matériau doit être suffisamment fluide pour être pompé et extrudé mais suffisamment ferme pour ne pas se déformer sous son propre poids et le poids des couches supérieures. Les différentes mesures de consistance à t_0 sont présentées dans la Figure 1.

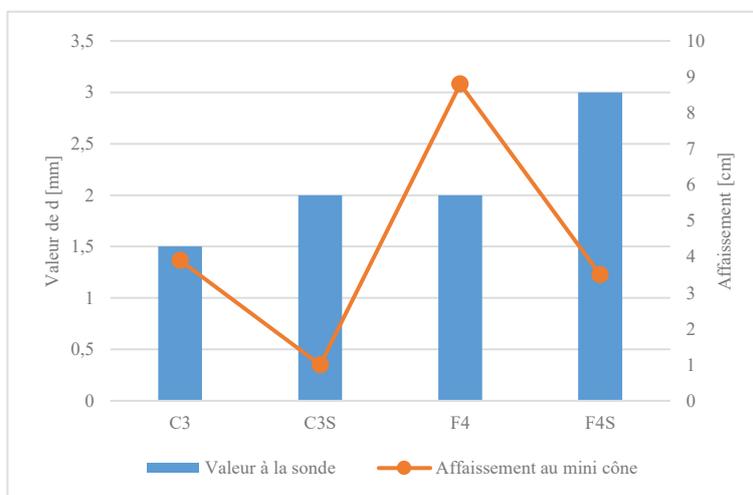


Figure 1. Valeur de consistance à la sonde de Vicat et au mini-cône des formules optimisées

L'ajout de ciment sulfo-alumineux génère une diminution de la maniabilité des formulations et ce, quel que soit le squelette granulaire. Metha [MET 73] a démontré que la formation d'ettringite colloïdale due à l'activation du CSA par la chaux libérée par le ciment Portland génère un raidissement rapide du mélange. La substitution de 25% de sable calcaire par du sable coquillé, bien que le E/C et la proportion de super-plastifiant soient plus importants, génère également une diminution de la maniabilité du mélange. Cet effet avait déjà été observé précédemment [CUA 16]. Cela est probablement dû à la forme des grains qui composent le sable coquillé. Le sable calcaire est composé de particules quasi-sphériques alors que le sable de coquilles saint-jacques est principalement composé d'aiguilles et de plaquettes. De Larrard [LAR 99] a démontré que la forme et la taille des grains ont une forte influence sur la compacité et par conséquent sur la rhéologie des formulations à l'état frais.

5. Hydratation et prise

Pour étudier l'effet des substitutions sur l'hydratation et la prise des différentes formules, deux essais ont été réalisés. La Figure 2 présente les courbes de chaleur d'hydratation des différentes formulations optimisées en fonction du temps. Le Tableau 2 présente les temps de début de prise et les temps de prise de ces mêmes formulations.

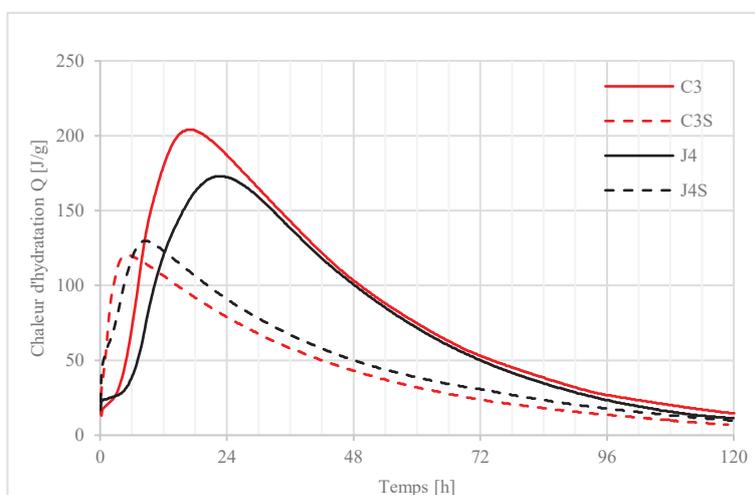


Figure 2. Chaleur d'hydratation mesurée avec le calorimètre semi-adiabatique

Tableau 2. Temps de début de prise et temps de prise des formules optimisées

	C3	C3S	J4	J4S
Temps de début de prise	4h40	2h00	5h30	1h36
Temps de prise	3h10	2h46	4h16	4h20

La substitution de 30% de CEM III par du CSA permet une accélération des réactions d'hydratation des ciments avec une augmentation rapide de la chaleur d'hydratation et une réduction du temps pour atteindre le maximum de la courbe, soit environ six heures pour les formulations C3S et F4S contre environ 18 heures pour la formulation de référence C3 et 21 heures pour la formulation F4. Les mêmes interprétations ressortent de l'essai de prise. Le CSA permet de réduire le temps de début de prise et ce, quel que soit le sable utilisé. De même, la substitution par du CSA réduit le temps de prise pour les deux formulations, avec un effet moins marqué pour le mélange avec du sable coquillé.

L'incorporation de sable coquillé dans les formulations génère un retard dans les réactions d'hydratations visible sur la courbe calorimétrique par un épaulement en début de courbe et un décalage du pic d'hydratation. Cette observation est confirmée par les essais de prise qui montrent un retard de début de prise et un retard de prise des formules avec sable coquillé. L'inhibition de prise, pour les formules J4 et J4S, est vraisemblablement due à la matière organique apportée par le sable coquillé. Des mesures de teneur en matière organiques du sable ont été réalisées suivant la norme XP P 94-047. Ces analyses montrent que le sable coquillé est composé de 1,2% de matière organique contre 0,5% pour le sable calcaire. L'étude menée par Cullinane et Brika [CUL 93] a démontré que la matière organique augmente le temps de prise et réduit les résistances mécaniques.

6. Conclusion

Les résultats présentés ici permettent de valider la plupart des critères de validité d'une formulation destinée à l'impression 3D par extrusion. La substitution de 30% du CEM III par du ciment sulfo-alumineux génère un raidissement des formulations après le malaxage et une accélération du temps de début de prise et d'hydratation. Cela permet d'améliorer la constructibilité des formulations mais risque d'être préjudiciable si le système d'impression demande des temps d'ouvrabilités très longs. L'utilisation de sable de coquille Saint-Jacques permet de valoriser des matériaux bio-sourcés et réduire l'utilisation de matériaux non renouvelables. En revanche, il génère une demande en eau et en super-plastifiant plus importante pour être extrudable et également un retard de l'hydratation et de prise.

[CUA 16] Cuadrado Rica H., Étude du comportement de bétons de coproduits coquilliers pour une utilisation en récifs artificiels. Thèse de doctorat, Université de Caen Normandie, 2016.

[CUL 93] CULLINANE, M. J., BRICKA, R.M., « An evaluation of organic materials that interfere with stabilization/solidification Processes », *Petroleum Contaminated Soils*, chap 12, 1993, p. 349-358.

[KAZ 17] KAZEMIAN A., YUAN X., COCHRAN E., KHOSHNEVIS B., « Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture », *Construction and Building Material*, vol. 145, 2017, p. 639-647.

[LAR 99] DE LARRARD, F., *Concrete mixture proportioning: A scientific approach*. Londres, E & FN SPON, 1999.

[LUK 04] LUKENS R. R., SELBERG C., « Guidelines for marine artificial reef materials. 2nd edition ». *Artificial reef subcommittees of the Atlantic and Gulf states marine fisheries commissions*, 2004, p. 205.

[MA 17] MA G. W., WANG L., « A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing », *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 12, 2017, p. 382-400.

[MET 73] METHA P. K., « Effect of lime on hydration of pastes containing gypsum and calcium aluminates or calcium sulfoaluminate », *Journal of American Ceramic Society*, vol. 56, 1973, p. 315-319.