
Durabilité des encres cimentaires à base de sable recyclé pour l'impression 3D

Auteur : Michels, Charlotte

Promoteur(s) : Courard, Luc

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil des constructions, à finalité spécialisée en "civil engineering"

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18184>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



UNIVERSITÉ DE LIÈGE

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

**DURABILITÉ DES ENCREs CIMENTAIRES À
BASE DE SABLE RECYCLÉ POUR
L'IMPRESSION 3D**

Travail de fin d'études réalisé par

Charlotte MICHELS

en vue de l'obtention du grade de master Ingénieur Civil des constructions

Composition du jury :

Luc Courard (Promoteur, ULiège)

Boyan Mihaylov (ULiège)

Julien Hubert (ULiège)

Yeakleang Muy (ULiège)

David Bulteel (Membre extérieur)

Aurélie de Boissieu (ULiège)

Année académique 2022-2023

Remerciements

Tout d'abord, je souhaite remercier mon promoteur M. le Prof. Luc Courard de m'avoir encadrée pendant la rédaction de mon travail de fin d'études. Il a toujours eu le temps de répondre à mes questions, de relire mon travail et de me donner des conseils précieux.

Ensuite, je tiens également à remercier chaleureusement Mme Yeakleang Muy qui m'a accompagnée tout le long de mon travail de fin d'études et qui a toujours été disponible pour répondre à toutes mes questions. Elle m'a guidée dans la réalisation des essais au laboratoire et m'a donné des suggestions précieuses pour la rédaction du travail. C'était un plaisir de travailler avec elle.

Un grand merci également à M. Julien Hubert de m'avoir encadrée dans la réalisation de mon travail de fin d'études et de m'avoir offert la possibilité de visiter des impressions 3D à Limelette. De plus, je lui suis très reconnaissante, ainsi qu'à Mme Yeakleang Muy, de m'avoir fait part de leurs résultats des essais déjà réalisés dans le cadre du projet CIRMAP avant mon arrivée. Sans eux, je n'aurais jamais pu baser mon analyse sur autant de résultats.

Puisque j'ai passé de nombreuses journées au laboratoire, je souhaite également remercier chaleureusement toute l'équipe du laboratoire de m'avoir si bien accueillie. Un grand merci surtout à Amaury et Yoan d'avoir réalisé les découpes des échantillons ainsi que les essais sur les résistances mécaniques.

Je remercie également Mme la Prof. Aurélie de Boissieu, M. le Prof. Boyan Mihaylov et M. le Prof. David Bulteel, membres de mon jury, pour le temps qu'ils consacrent à la lecture de mon travail.

De plus, je souhaite remercier l'équipe du laboratoire de BuildWise à Limelette grâce à laquelle j'ai eu la chance de participer à des impressions 3D.

Un grand merci également à ma marraine Mme Elisabeth Michels d'avoir relu le travail afin de corriger les fautes d'orthographe.

Finalement, j'aimerais encore remercier ma famille, mes amis et mes camarades de classe pour leur soutien moral tout au long de mes études et surtout pendant ces derniers mois.

Résumé

L'impression 3D béton est une nouvelle méthode de fabrication qui est actuellement en développement dans le secteur de la construction. Bien qu'il y ait encore de nombreuses limitations de cette méthode de fabrication à l'heure actuelle, elle est sujet de multiples recherches à cause de son potentiel considérable et ses nombreux avantages.

Un autre sujet qui gagne de plus en plus en importance à cause des problèmes liés au réchauffement climatique et à l'exploitation excessive des ressources naturelles est le recyclage des déchets de construction et de démolition. Une application potentielle du sable recyclé se trouve dans l'impression 3D béton.

Le présent travail de fin d'études qui est réalisé dans le cadre du projet CIRMAP combine ces deux thématiques actuelles. Le but du projet CIRMAP est d'imprimer du mobilier urbain en utilisant un mortier à base de sable recyclé. Dans le cadre de ce travail de fin d'études, l'influence du processus de fabrication par impression 3D ainsi que l'influence de la substitution du sable naturel par du sable recyclé sur les propriétés mécaniques et sur la durabilité ont été étudiées. Pour cela, différents essais ont été réalisés au laboratoire sur des échantillons moulés avec des mortiers à base de sable naturel et à base de sable recyclé ainsi que sur des échantillons imprimés avec un mortier à base de sable recyclé.

Les essais réalisés ont révélé que le mortier testé dans le cadre du présent projet constitue un matériau très compact et d'une qualité excellente. En effet, les résultats obtenus indiquent que ce mortier imprimé à base de sable recyclé présente des résistances mécaniques élevées et des propriétés de porosité et d'absorption d'eau favorables. De plus, les essais de gel-dégel et de carbonatation ont montré que sa durabilité est également bonne et que les pièces imprimées en utilisant ce mortier subiront peu de vieillissement face à leur environnement extérieur.

Ce travail de fin d'études est divisé en deux parties principales. La première est une revue de littérature qui traite les sujets d'impression 3D, de sable recyclé et de durabilité et présente les résultats de différentes études qui ont déjà été réalisées sur ces thèmes. Dans la deuxième partie principale, les différents essais réalisés au laboratoire sont présentés et les résultats obtenus sont discutés.

Abstract

Concrete 3D printing is a new manufacturing method that is currently in the development stage in the construction sector. Although there are still many limitations to this method in this sector, concrete 3D printing is the subject of many different research programs because of its considerable potential and its numerous advantages.

Recycling construction and demolition waste is another subject that is becoming increasingly important in the light of global warming and the over-exploitation of natural resources. One potential application for recycled sand is in 3D concrete printing.

This master thesis, which is part of the CIRMAP project, combines these two current topics. The aim of the CIRMAP project is to print urban furniture using a mortar based on recycled sand. In this master thesis, the influence of the 3D printing manufacturing process as well as the influence of the substitution of natural sand by recycled sand on mechanical and durability properties were studied. Various tests were carried out in the laboratory on both moulded and printed samples. Moulded samples with mortars based on natural and recycled sand as well as printed samples with a mortar based on recycled sand were tested.

The tests that were carried out revealed that the mortar developed and tested as part of this project is a very compact material of excellent quality. In fact, the results obtained during the different tests indicate that this printed mortar which contains recycled instead of natural sand presents high mechanical resistances as well as favourable porosity and water absorption properties. In addition, freeze-thaw and carbonation tests have shown that its durability is also good and that pieces printed using this mortar will suffer little ageing because of the external environment on which they are exposed.

This master thesis consists of two main parts. The first one is a state-of-the-art that deals with the subjects of 3D printing, recycled sand and durability, and presents the results of various studies that have already been carried out on these topics. In the second main part, the various tests carried out in the laboratory are presented and the results obtained are discussed.

Table des matières

Remerciements	I
Résumé	II
Abstract	III
1 Introduction	1
2 Revue de littérature	3
2.1 Impression 3D dans le secteur de la construction	3
2.1.1 Définition et processus	3
2.1.2 Impression 3D "classique"	4
2.1.3 Impression 3D pour le béton	4
2.1.4 Premiers exemples d'applications	7
2.1.5 Propriétés à l'état frais du béton imprimé	10
2.1.6 Propriétés à l'état durci du béton imprimé	15
2.1.7 Avantages et opportunités de l'impression 3D béton	18
2.1.8 Recherches actuelles et futures	20
2.2 Sable recyclé	24
2.2.1 Recyclage des déchets de construction et de démolition	24
2.2.2 Sable recyclé et impression 3D	26
2.2.3 Influence du sable recyclé sur les propriétés à l'état frais du mortier	27
2.2.4 Influence du sable recyclé sur les propriétés à l'état durci du mortier	32
2.3 Durabilité	38
2.3.1 Définition et indicateurs de durabilité	38
2.3.2 Carbonatation	40
2.3.3 Comportement du béton soumis à des cycles de gel et dégel	41
2.3.4 Comportement du béton soumis aux sels de déverglaçage	45
2.3.5 Durabilité et impression 3D	46
3 Matériaux et fabrication	50
3.1 Matériaux utilisés	50
3.2 Composition du mortier	51
3.3 Fabrication des échantillons	52
3.3.1 Fabrication des échantillons moulés	53
3.3.2 Fabrication des échantillons imprimés	56

4	Approche expérimentale et résultats obtenus	59
4.1	Propriétés à l'état frais	59
4.1.1	Table à secousses (<i>Flow table test</i>)	59
4.1.2	Essai au pistolet	62
4.2	Adhérence	65
4.3	Résistances en compression et en flexion	68
4.4	Porosité, masse volumique réelle et masse volumique apparente	75
4.5	Absorption d'eau	81
4.6	Comportement au gel - dégel	87
4.7	Carbonatation	93
5	Analyse transversale des résultats	96
5.1	Comparaison mortier à base de sable naturel - mortier à base de sable recyclé	96
5.2	Comparaison échantillons moulés - échantillons imprimés	97
5.3	Durabilité	99
6	Conclusion	100
	Bibliographie	102
	Normes	107
	Annexes	108
A.1	Fiche technique du ciment CEM I 52,5 N	108
A.2	Résultats des essais de cisaillement pour étudier l'adhérence	110
A.3	Résultats des essais de traction directe pour étudier l'adhérence	114
A.4	Résultats des essais de flexion	119
A.4.1	Échantillons moulés, sable naturel	119
A.4.2	Échantillons moulés, sable recyclé	125
A.4.3	Échantillons imprimés, sable recyclé, testés dans le sens de pose	131
A.4.4	Échantillons imprimés, sable recyclé, testés dans le sens perpendiculaire à la pose	136
A.5	Résultats des essais de compression	141
A.5.1	Échantillons moulés, sable naturel	141
A.5.2	Échantillons moulés, sable recyclé	147
A.5.3	Échantillons imprimés, sable recyclé, testés dans le sens de pose	153
A.5.4	Échantillons imprimés, sable recyclé, testés dans le sens perpendiculaire à la pose	158
A.6	Résultats des essais de porosité : porosité accessible à l'eau, masse volumique réelle, masse volumique apparente	163
A.6.1	Échantillons moulés, sable naturel	163
A.6.2	Échantillons moulés, sable recyclé	164
A.6.3	Échantillons imprimés, sable recyclé	166
A.7	Résultats des essais d'absorption d'eau par capillarité	167
A.7.1	Échantillons moulés, sable naturel	167
A.7.2	Échantillons moulés, sable recyclé	168
A.7.3	Échantillons imprimés, sable recyclé	169
A.7.4	Échantillons moulés, sable recyclé, avec peinture sur les autres faces	170
A.8	Résultats des essais de carbonatation accélérée	171

A.8.1	Échantillons moulés, sable naturel, résistances en compression et en flexion	171
A.8.2	Échantillons moulés, sable recyclé, résistances en compression et en flexion	180
A.8.3	Échantillons imprimés, sable recyclé, résistances en compression et en flexion	189
A.9	Résultats des essais de gel-dégel	198
A.9.1	Échantillons moulés, sable naturel	198
A.9.2	Échantillons moulés, sable recyclé	199
A.9.3	Échantillons imprimés, sable recyclé	201

Table des figures

2.1	Les trois méthodes principales d'impression 3D béton [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022]	7
2.2	Le plus grand bâtiment imprimé à Dubai [p. p. M. W. 3D NATIVES 2019a]	8
2.3	Le robot d'impression utilisé par Apis Cor [APISCOR 2019]	8
2.4	Le site d'impression à Dubai [APISCOR 2019]	8
2.5	L'impression à Dubai [F.P. BOS et al. 2022]	8
2.6	La maison imprimée à Beckum [F.P. BOS et al. 2022]	9
2.7	Le site d'impression à Beckum [F.P. BOS et al. 2022]	9
2.8	Passerelle <i>The Striatum</i> à Venise [F.P. BOS et al. 2022]	9
2.9	Assemblage sur site de la passerelle <i>The Striatum</i> [F.P. BOS et al. 2022]	9
2.10	Comparaison des compositions de différents types de bétons [REHMAN et KIM 2021]	14
2.11	Directions des forces appliquées par rapport au sens des couches [REHMAN et KIM 2021]	15
2.12	Anisotropie de la résistance en compression des éléments imprimés en 3D [REHMAN et KIM 2021]	16
2.13	Anisotropie de la résistance en flexion des éléments imprimés en 3D [REHMAN et KIM 2021]	17
2.14	Passerelle avec tendons aux Pays Bas [ASPRONE et al. 2018]	24
2.15	Les différents types de déchets inertes [FEREDECO et al. 2022]	24
2.16	Les différents types de granulats recyclés [FEREDECO et al. 2022]	25
2.17	Projet CIRMAP [AREBS 2023]	27
2.18	Variation du diamètre en fonction du temps lors de l'essai de compression pour les trois séries testées [DING, XIAO, QIN et al. 2020]	29
2.19	Développement de la résistance en compression au jeune âge [DING, XIAO, QIN et al. 2020]	29
2.20	Évolution du seuil de cisaillement pour les différents mortiers [ZOU, XIAO, DUAN et al. 2021]	31
2.21	Seuil de cisaillement statique en fonction du temps de repos [ZOU, XIAO, DUAN et al. 2021]	31
2.22	Mode de rupture lors de l'impression 3D pour différents mortiers [ZOU, XIAO, DUAN et al. 2021]	32
2.23	Les différentes directions d'application de charges [REHMAN et KIM 2021]	33
2.24	Résistance en compression [DING, XIAO, ZOU et al. 2020]	34
2.25	Résistance au fendage par traction [DING, XIAO, ZOU et al. 2020]	34
2.26	Résistance en flexion [DING, XIAO, ZOU et al. 2020]	35
2.27	Retrait plastique libre dans le cas de 100 % de sable naturel [H. ZHANG et XIAO 2021]	37

2.28	Retrait plastique libre dans le cas de 100 % de sable recyclé [H. ZHANG et XIAO 2021]	37
2.29	"Durabilité des bétons en fonction du rapport E/C et du facteur d'espacement après 300 cycles de gel-dégel d'après les travaux de Okada et al. (1981) présenté par Korhonen (2002)" [BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS 2021]	45
3.1	Courbes granulométriques [Y. MUY et al. 2023]	51
3.2	Fabrication du mortier	54
3.3	Table à secousses	54
3.4	Moule utilisé pour la fabrication des barrettes 4 x 4 x 16 cm ³	54
3.5	Stockage des échantillons dans l'eau	55
3.6	Fabrication des cubes 15 x 15 x 15 cm ³	55
3.7	Préparation des échantillons pour les essais de gel-dégel	56
3.8	Le robot pour l'impression 3D chez BuildWise à Limelette	57
3.9	Impression d'une "forme en S" à Limelette	57
3.10	Fabrication des échantillons imprimés	58
4.1	<i>Flow table test</i>	60
4.2	Pistolet utilisé pour simuler l'impression	62
4.3	Essai au pistolet	62
4.4	Essais d'extrudabilité sur le mortier à base de sable recyclé après 10, 20, 30, 40, 50 et 60 minutes de contact entre l'eau et le ciment	63
4.5	Essais d'extrudabilité sur le mortier à base de sable naturel après 10, 20, 30, 40, 50 et 60 minutes de contact entre l'eau et le ciment	64
4.6	Essais de cisaillement et de traction directe	65
4.7	Rupture en cisaillement - Echantillons imprimés à Limelette, après 28 jours	66
4.8	Rupture en cisaillement - Echantillons imprimés à Douai, après 91 jours	66
4.9	Rupture en traction - Échantillons imprimés à Limelette, après 28 jours	67
4.10	Rupture en traction - Échantillons imprimés à Douai, après 91 jours	67
4.11	Directions des forces appliquées par rapport au sens des couches [REHMAN et KIM 2021]	69
4.12	Essai de flexion	70
4.13	Essai de compression	70
4.14	Comparaison de la résistance en compression	71
4.15	Influence des conditions de cure sur la résistance en compression [Yeakleang MUY, HUBERT, COURARD et al. 2023]	72
4.16	Comparaison de la résistance en flexion	74
4.17	Récipient connecté à l'appareillage à vide	75
4.18	Échantillons dans l'étuve	75
4.19	Comparaison de la porosité	77
4.20	Comparaison de la masse volumique apparente	78
4.21	Comparaison de la masse volumique réelle	80
4.22	Essai d'absorption par capillarité sur les différentes faces des échantillons	81
4.23	Essai d'absorption par capillarité avec de la peinture sur les surfaces non testées	81
4.24	Définition des différentes surfaces par lesquelles l'absorption d'eau sera testée pour les échantillons moulés	82

4.25	Absorption d'eau par capillarité sur les différentes surfaces des échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé	83
4.26	Absorption d'eau par capillarité sur les différentes surfaces des échantillons moulés avec le mortier à base de sable naturel	84
4.27	Absorption d'eau par capillarité avec et sans peinture sur les surfaces non testées, échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé	85
4.28	Absorption d'eau pour les trois séries d'échantillons testées	86
4.29	Déroulement des cycles de gel-dégel [CEN/TS 12390-9]	87
4.30	État de surface final après 91 jours pour les échantillons moulés à base de sable recyclé	89
4.31	État de surface final après 91 jours pour les échantillons moulés à base de sable naturel	89
4.32	État de surface final après 91 jours pour les échantillons imprimés à base de sable recyclé	89
4.33	Comparaison des conditions : eau, solution saline, air (échantillons imprimés à base de sable recyclé)	90
4.34	Essais de gel-dégel avec eau	91
4.35	Essais de gel-dégel avec solution saline	92
4.36	Front de carbonatation pour les échantillons imprimés à Limelette	94
4.37	Front de carbonatation pour les échantillons moulés à base de sable recyclé	94
4.38	Front de carbonatation pour les échantillons moulés à base de sable naturel	95
6.1	Rendu CaD du banc imprimé dans le cadre du projet CIRMAP [Y. MUY et al. 2023]	101
6.2	Images de parties du banc imprimé dans le cadre du projet CIRMAP [Y. MUY et al. 2023]	101

Chapitre 1

Introduction

Aujourd'hui, dans un monde où des thèmes comme le réchauffement climatique et la préservation des ressources naturelles sont devenues primordiales, des changements sont nécessaires dans le secteur de la construction. Le béton est un matériau énormément utilisé dans la construction : après l'eau, le béton prend la deuxième place des matériaux les plus utilisés du monde [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023]. Cela est problématique d'un point de vue environnemental, car la production de ciment, en particulier, nécessite énormément d'énergie. De ce fait, la production de béton est responsable d'une part significative des émissions CO₂ [Freek BOS et al. 2016]. Un autre grand problème du secteur de la construction est qu'il produit des quantités importantes de déchets de démolition chaque année. Par conséquent, le recyclage des déchets de construction et de démolition est un point essentiel si on veut basculer vers un secteur plus respectueux de l'environnement [ZHAO et al. 2015]. Ce travail de fin d'études présentera une possibilité prometteuse pour améliorer le bilan environnemental du secteur de la construction : la fabrication par impression 3D avec un mortier à base de 100% de sable recyclé.

L'impression 3D est une technologie récente déjà présente dans de nombreux domaines, comme par exemple dans celui de la médecine. Dans le secteur de la construction, cette technologie est encore à ses débuts. Cependant, à cause de son grand potentiel, de nombreuses recherches sont réalisées actuellement sur ce sujet [HAMIDI et ASLANI 2019]. D'un point de vue environnemental, l'impression 3D permet de diminuer considérablement la quantité de béton utilisée par optimisation, en plaçant du béton uniquement aux endroits où on en a besoin. De plus, en utilisant cette technologie, il est possible de diminuer fortement ou même d'éliminer complètement la quantité de coffrages nécessaire. Cela permettrait non seulement de réduire le coût de construction, mais également d'éviter une consommation de ressources pour la fabrication des coffrages, qui sont indispensables dans les techniques de construction traditionnelles utilisées à l'heure actuelle [DE SCHUTTER et al. 2018]. Cependant, la grande majorité des mortiers imprimables développés à l'heure actuelle contient une quantité très importante de ciment ainsi que beaucoup de sable naturel [REHMAN et KIM 2021]. D'où deux possibilités existent pour améliorer le bilan environnemental de ces mortiers imprimables : substituer le ciment par des liants alternatifs et substituer le sable naturel par du sable recyclé. C'est cette deuxième possibilité qui est abordée dans ce travail de fin d'études.

Ce travail de fin d'études est réalisé dans le cadre du projet Interreg NWE CIRMAP (**C**ircular economy via customisable furniture with **R**ecycled **M**aterials for public **P**laces), dans lequel la technique d'impression 3D béton est utilisée pour créer du mobilier urbain.

Le mortier imprimable développé lors du projet CIRMAP est un mortier à base de 100% de sable recyclé. L'objectif du présent travail est d'étudier l'influence d'une part du processus de fabrication par impression 3D et d'autre part de la substitution du sable naturel par du sable recyclé sur les propriétés mécaniques et la durabilité. La recherche devrait permettre de répondre à la question si des pièces imprimées en utilisant ce mortier à base de sable recyclé présentent des propriétés suffisamment bonnes en termes de résistances mécaniques et de durabilité pour une utilisation régulière. Puisque le mobilier urbain produit sera exposé à l'environnement extérieur, les études de durabilité sont d'une importance majeure. Comme on ne retrouve pas d'armatures en acier dans ce type d'application, les études de durabilité dans ce travail vont se concentrer essentiellement sur le comportement du béton soumis à des cycles de gel et dégel, avec présence éventuelle de sels de déverglaçage, ainsi que sur la carbonatation.

Ce travail de fin d'études sera divisé en plusieurs parties. La première grande partie consistera en une revue de littérature basée sur les trois grands thèmes du travail : l'impression 3D béton dans le secteur de la construction, l'utilisation du sable recyclé dans la formulation de mortiers ou bétons, et finalement la durabilité. Dans cette partie, les notions importantes en lien avec ces trois sujets seront introduites et l'état actuel des recherches sera présenté.

La deuxième partie de ce travail traitera les matériaux utilisés ainsi que la composition du mortier testé. De plus, la fabrication des échantillons sera décrite. Une partie des échantillons testés sera moulée, alors que l'autre partie sera imprimée, ce qui permettra de détecter l'influence de la méthode de fabrication par impression.

La troisième partie du travail sera alors dédiée aux différents essais réalisés et aux résultats obtenus. Ensuite, la quatrième partie consistera en une analyse transversale des résultats. Le but de cette partie sera de mettre en évidence l'influence de la substitution du sable naturel par du sable recyclé ainsi que l'influence de la fabrication par impression 3D par rapport à une fabrication classique. Finalement, l'ensemble des résultats obtenus lors des différents essais pourra être consulté en annexe.

Chapitre 2

Revue de littérature

2.1 Impression 3D dans le secteur de la construction

2.1.1 Définition et processus

L'impression 3D béton est un processus de fabrication additive qui pourrait être utilisé afin d'automatiser en partie le secteur de la construction. Dans ce processus, des éléments de construction ou même des bâtiments entiers peuvent être fabriqués sur base d'un modèle numérique 3D, en déposant le matériau couche par couche à travers la buse d'une imprimante 3D [SESETTI, LALITHYA et KUMAR 2022]. Au début, l'impression 3D était limitée à des objets petits, mais cette technologie a également trouvé des applications à plus grande échelle à l'heure actuelle, par exemple dans le secteur de la construction [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022]. Cependant, dans ce secteur, l'impression 3D en est encore à ses débuts et n'a pas encore développé tout son potentiel à cause de nombreux défis restants, comme par exemple des techniques d'impression qui ne sont pas encore parfaitement adaptées à l'impression à grande échelle ou des limitations à cause des matériaux [HAMIDI et ASLANI 2019].

Une grande variété de matériaux différents a déjà été utilisée dans différentes techniques d'impression 3D, comme les polymères, l'acier, les céramiques ou encore le béton [HAMIDI et ASLANI 2019]. Pour le développement de l'impression 3D ainsi que pour son application, des experts dans trois domaines différents, qui sont tous importants pour la réussite, sont nécessaires : le modèle digital, la machine d'impression et le matériau utilisé [F.P. BOS et al. 2022]. HAMIDI et al. [HAMIDI et ASLANI 2019] soulignent l'importance de recherches interdisciplinaires entre la technologie d'impression 3D en soi et les sciences des matériaux. En effet, comme ce sera expliqué dans la suite de cette revue de littérature, le matériau utilisé doit répondre à des exigences spécifiques pour pouvoir être imprimé.

Pour produire une pièce imprimée en 3D, en général quatre étapes sont nécessaires : d'abord la conception du modèle, ensuite le découpage du modèle, suivi par l'impression en soi, et finalement un post-traitement tel qu'une finition de la surface [SESETTI, LALITHYA et KUMAR 2022]. La première étape consiste toujours dans la création d'un modèle 3D en utilisant un logiciel CAD (*computer-aided design*) approprié. Ensuite, le fichier créé est exporté dans un format pour échanger des données 3D tel que le format STL qui est le plus souvent utilisé [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023] [SESETTI, LALITHYA et KUMAR 2022]. Le découpage du modèle est réalisé avec un logiciel spécialement conçu à cet effet et les couches ainsi découpées sont transmises à l'imprimante sous forme de

code machine. La machine d'impression, dans le cas de l'impression 3D béton, peut avoir différentes formes telles qu'un bras robotique ou un portique [SESETTI, LALITHYA et KUMAR 2022]. Les imprimantes soutenues par un portique fonctionnent selon un système de coordonnées cartésiennes et sont généralement utilisées pour des projets de grande taille. Les imprimantes à bras robotisé fonctionnent sur 6 axes ce qui a l'avantage que la résolution est plus élevée et qu'il est possible de créer des géométries plus complexes. Des caractéristiques comme la résolution d'impression et le volume de l'impression dépendent du système d'impression, mais également du fabricant et évidemment de l'application prévue [p. p. M. W. 3D NATIVES 2021a].

2.1.2 Impression 3D "classique"

L'impression 3D est une technologie relativement récente, mais qui est en pleine expansion depuis les dernières années. Il y a différentes techniques d'impression parmi laquelle la stéréolithographie qui a été inventée en 1984 par Charles Hull. Les matériaux utilisés dans la stéréolithographie sont des résines synthétiques mélangées avec des additions dont la réaction de polymérisation est initiée par des rayons de lumière UV qui sont émis par l'imprimante. Un avantage de la stéréolithographie est la haute précision et, par conséquent, des géométries très complexes peuvent être imprimées [HAGER, GOLONKA et PUTANOWICZ 2016]. Cependant, seulement un nombre limité de matériaux peuvent être considérés dans cette méthode [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023].

Une autre technique d'impression utilisée est le frittage sélectif par laser (*selective laser sintering SLS*) qui a été développé dans les années 80 [p. p. M. W. 3D NATIVES 2019b]. Dans cette technique, le laser de l'imprimante est utilisé pour faire fondre des particules en poudre ensemble ce qui va créer l'objet. Des matériaux utilisés pour le frittage sélectif par laser sont par exemple le nylon ou encore le polystyrène [HAGER, GOLONKA et PUTANOWICZ 2016]. Après impression et refroidissement, la poudre non fusionnée doit être nettoyée dans l'étape de post-traitement [p. p. M. W. 3D NATIVES 2019b].

Une autre méthode d'impression, le *Fused Deposition Modelling FDM*, a été inventée par S. Scott Crump en 1988. Dans cette technique, des matériaux ductiles, qui durcissent pendant leur refroidissement, sont extrudés par une buse et déposés en couches successives. Comme matériau, on utilise des filaments comme par exemple des thermoplastiques, qui sont chauffés par la buse pour être à une température proche de leur température de fusion. Pendant les dernières années, le *Fused Deposition Modelling* est devenu la technique d'impression 3D la plus utilisée, avec une large gamme de matériaux exploités [HAGER, GOLONKA et PUTANOWICZ 2016]. Il y a différentes types d'imprimantes FDM : celles qui sont les plus utilisées travaillent avec un système de coordonnées cartésiennes, c'est-à-dire avec trois axes orthogonaux. Un avantage de ces imprimantes est qu'elles sont généralement peu coûteuses [p. p. M. W. 3D NATIVES 2021b].

2.1.3 Impression 3D pour le béton

Le matériau pour impression 3D qui est le plus utilisé dans le secteur de la construction est le béton. À cause de sa transition naturelle d'un état liquide à un état solide, ce matériau se prête bien à l'impression, même s'il y a encore des difficultés pour obtenir les propriétés désirées. Les polymères sont aussi utilisés dans l'impression 3D dans la construction, mais beaucoup moins que le béton, et souvent uniquement pour des raisons esthétiques ou en

combinaison avec d'autres matériaux. Bien qu'ils aient des propriétés très favorables à l'impression, ils ne peuvent pas être utilisés comme éléments structuraux à cause de leur raideur et résistance faibles [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023].

La qualité de la pièce imprimée en béton dépend fortement des caractéristiques de l'imprimante : par exemple la vitesse d'impression, la buse utilisée, l'épaisseur des couches et le temps entre la déposition de deux couches successives vont influencer les propriétés de la pièce finale [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023] [XIAO et al. 2020]. BOS et al. [F.P. BOS et al. 2022] ont étudié différents projets à grande échelle réalisés par impression 3D. Ils notent que la vitesse d'impression varie d'un projet à l'autre et se trouve généralement entre 50 mm/s et 250 mm/s. En plus, il est important que la vitesse avec laquelle la buse se déplace corresponde à la vitesse d'extrusion du mortier. En effet, si la tête d'imprimante se déplace trop vite, la largeur des couches imprimées devient plus petite que prévue ce qui peut causer des discontinuités. D'autre côté, si la vitesse de déplacement est trop lente par rapport à la vitesse d'extrusion, cela induit des accumulations de mortier non désirées. Pour un bon résultat, il est également important de concevoir le chemin d'impression aussi continu que possible afin d'éviter des interruptions dans l'extrusion [XIAO et al. 2020]. Finalement, il faut faire attention au fait que toutes les imprimantes ne sont pas compatibles avec tous les mélanges [EL CHEIKH et PIÉRARD 2022].

Pour évaluer le coût d'un système à impression, on doit prendre en compte toutes les étapes impliquées : le transport du béton jusqu'à la buse de l'imprimante, le positionnement précis de la buse et l'extrusion du béton [DE SCHUTTER et al. 2018]. Les dispositifs nécessaires pour le processus comprennent un malaxeur, une pompe et une imprimante. Le prix de l'imprimante 3D pour béton peut varier significativement : les moins chères commencent aux alentours de 75 000 euros, mais le prix peut aller jusqu'à plusieurs millions d'euros [EL CHEIKH et PIÉRARD 2022]. XIAO et al. [XIAO et al. 2020] notent qu'un système d'impression est constitué généralement de quatre sous-systèmes nécessaires :

1. Le sous-système de support dont le rôle est de porter la tête d'imprimante,
2. Le sous-système de contrôle nécessaire pour contrôler le mouvement de la tête d'imprimante dans les trois directions de l'espace,
3. Le sous-système d'alimentation responsable pour pomper le mortier mélangé jusqu'à la tête d'imprimante,
4. Le sous-système d'extrusion qui doit assurer une extrusion continue du mortier à travers la buse [XIAO et al. 2020].

Les trois méthodes d'impression 3D béton les plus connues sont *Contour Crafting*, *Concrete Printing* et *D-Shape*. En général, on distingue entre deux grands types de techniques : l'extrusion et la liaison par poudre. *Contour Crafting* et *Concrete Printing* font partie des techniques par extrusion alors que *D-Shape* est une technique de liaison par poudre [SESETTI, LALITHYA et KUMAR 2022] [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022].

Contour Crafting

Dans cette technique, le pourtour de la pièce qui peut par exemple être un mur, est imprimé en déposant le béton par couches successives. Ensuite, le vide à l'intérieur de ce pourtour peut être rempli en coulant du béton dedans. Dans ce cas, la partie imprimée joue le rôle de coffrage perdu [SESETTI, LALITHYA et KUMAR 2022] [J. ZHANG et al.

2019]. Dans la méthode du *Contour Crafting*, la finition de surface est lisse à cause de truelles installées à côté et au-dessus de la buse [p. p. M. W. 3D NATIVES 2018].

Un avantage de cette méthode d'impression est la bonne qualité de surface obtenue. De plus, dans cette technique, il est facilement possible d'inclure les conduits pour l'électricité, la plomberie et la climatisation [J. ZHANG et al. 2019]. Le *Contour Crafting* est en général utilisé pour imprimer des éléments verticaux qui vont travailler en compression. Si des ouvertures doivent être incluses, par exemple des portes ou fenêtres dans le cas d'un mur imprimé, un linteau est posé et l'impression du mur au-dessus de l'ouverture peut continuer sur celui-ci [HAMIDI et ASLANI 2019].

Concrete Printing

Comme le *Contour Crafting*, le *Concrete Printing* est également basé sur la technique d'impression FDM (*Fused Deposition Modelling*) : le mortier est extrudé par la tête d'imprimante et ensuite empilé couche par couche jusqu'à obtenir l'objet final [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023]. Dans la méthode du *Concrete Printing*, toute la géométrie d'une couche est directement imprimée au lieu d'imprimer d'abord le bord extérieur. Ainsi, la structure entière est imprimée et elle ne peut pas servir comme coffrage perdu pour du béton coulé [J. ZHANG et al. 2019]. Contrairement au *Contour Crafting*, la finition de surface n'est pas lisse dans le cas du *Concrete Printing*, mais on retrouve une finition nervurée avec les couches clairement visibles. Il est cependant possible d'obtenir une surface lisse par post-traitement. Dans le cas où on veut imprimer un élément dont une partie est en porte-à-faux, un support additionnel doit être utilisé [HAMIDI et ASLANI 2019].

D-Shape

Cette méthode d'impression 3D est une technique de liaison par poudre et se distingue fondamentalement des deux autres méthodes présentées qui étaient des techniques par extrusion. Dans une technique de liaison par poudre, un liant liquide est projeté sur un matériau en poudre afin de le lier aux endroits choisis qui font partie de la structure. À la fin, la poudre non liée est enlevée en soufflant de l'air [SESETTI, LALITHYA et KUMAR 2022].

Dans la technique *D-Shape*, l'impression d'une couche commence par la mise en place d'une couche de mélange sec d'agrégats fins et de liant qui est en général du ciment. Ensuite, la buse de l'imprimante va faire couler le mélange d'eau et d'adjuvants sélectivement sur ce mélange sec. Ainsi, le ciment est seulement activé aux endroits désirés, pendant que le reste du mélange sec reste sous forme de poudre [HAMIDI et ASLANI 2019]. Alors que dans les techniques d'impression par extrusion, une seule buse est utilisée, dans la technique *D-Shape*, on peut retrouver jusqu'à 300 buses [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023].

Cette méthode d'impression est utilisée hors site pour fabriquer des éléments de construction plutôt petits [SESETTI, LALITHYA et KUMAR 2022]. Elle est bien adaptée à des éléments avec des géométries complexes [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022]. En effet, un avantage important de cette technique est qu'il n'y a quasi aucune limitation de design. De plus, la résolution est bonne, même pour des objets de plus grande taille. Dans le cas d'une pièce en porte-à-faux, dans cette technique, la poudre de sable et ciment non lié peut servir comme matériau de support [HAMIDI et ASLANI 2019].



FIGURE 2.1 – Les trois méthodes principales d'impression 3D béton [SAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022]

2.1.4 Premiers exemples d'applications

Au cours des dernières années, l'intérêt pour l'utilisation de l'impression 3D dans la fabrication de structures à grande échelle a fortement augmenté [HAMIDI et ASLANI 2019]. Cependant, un des grands problèmes pour le développement de l'impression 3D dans le secteur de la construction est le manque de données expérimentales et d'informations, surtout pour les projets à grande échelle. C'est pourquoi les projets pilotes sont essentiels. Il existe de tels projets pour de nombreuses applications différentes, allant du mobilier urbain à des maisons et bureaux et même des petits ponts. En général, le but de ces projets est soit de montrer les possibilités offertes par l'impression 3D soit d'étudier des aspects spécifiques des applications à grande échelle [F.P. BOS et al. 2022]. Quelques-uns de ces projets pilotes sont présentés par la suite. On peut voir que de tels projets peuvent être trouvés à de nombreux endroits différents du monde.

En 2014, l'entreprise chinoise WinSun a imprimé une série de maisons en 3D en utilisant comme matériau d'impression un mélange de déchets industriels, fibres de verre, ciment et agent de durcissement. Les différentes parties des maisons ont été imprimées hors site comme des éléments préfabriqués et ont été assemblées sur chantier. L'imprimante utilisée pour imprimer les différents éléments avait une hauteur de 6 mètres, une largeur de 10 mètres et une longueur de 40 mètres. En 2015, cette même entreprise a réussi à imprimer une maison à cinq étages en utilisant la même technique d'impression [HAGER, GOLONKA et PUTANOWICZ 2016].

Le plus grand bâtiment imprimé en 3D (en volume) à l'heure actuelle se trouve à Dubai. La ville de Dubai s'est fixé l'objectif de construire 25 % de ses structures par la méthode d'impression 3D béton d'ici 2030 [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023]. Ce bâtiment a été réalisé en 2019 par l'entreprise ApisCor. Il s'agit d'un bâtiment de bureaux avec deux étages, une hauteur totale de 9,5 m et une aire de 640 m², dont l'impression a duré 500 heures. Les murs d'une hauteur de 4,7 m ont été imprimés directement sur site. Pour construire ce bâtiment, l'entreprise a commencé par imprimer des murs avec des diagonales à l'intérieur. Les vides à l'intérieur des murs permettent d'améliorer l'isolation thermique et de réduire ainsi la consommation d'énergie. Dans ces murs imprimés se trouvent également des cavités qui vont servir comme coffrage perdu pour les colonnes. Une fois les murs imprimés, les armatures en acier ont été installées manuellement et le béton a été coulé dans les coffrages perdus [F.P. BOS et al. 2022] [p. p. M. W. 3D NATIVES 2019a].

Le bâtiment était imprimé sur site ce qui constituait un défi particulier à cause des conditions climatiques extrêmes à Dubai. En effet, l'impression se déroulait en grandes parties pendant la nuit vu que la température à Dubai peut excéder 40°C pendant la journée. Pour imprimer ce bâtiment, une imprimante de type robot cylindrique a été utilisée et se trouvait à 22 positions différentes lors du processus d'impression. Cet exemple d'une imprimante qui a changé de position montre que la taille de la structure complète n'est pas forcément limitée par la taille de l'imprimante [F.P. BOS et al. 2022]. La municipalité de Dubai a estimé que la construction de ce bâtiment a généré environ 60% de déchets en moins par rapport à une méthode de construction traditionnelle [p. p. M. W. 3D NATIVES 2019a].

Ce bâtiment de bureaux est conforme aux normes de conception locales. En effet, ceci est possible car les planchers sont préfabriqués et parce que la structure en béton armé, se trouvant à l'intérieur des coffrages perdus imprimés, est considérée comme l'élément porteur. Les murs imprimés ne sont donc pas considérés comme éléments porteurs [F.P. BOS et al. 2022]. Des images de ce bâtiment imprimé à Dubai par Apis Cor ainsi que du site d'impression et du bras robotique utilisé pour l'impression peuvent être trouvées aux FIGURES 2.2, 2.3, 2.4 et 2.5.



FIGURE 2.2 – Le plus grand bâtiment imprimé à Dubai [p. p. M. W. 3D NATIVES 2019a]



FIGURE 2.3 – Le robot d'impression utilisé par Apis Cor [APISCOR 2019]



FIGURE 2.4 – Le site d'impression à Dubai [APISCOR 2019]



FIGURE 2.5 – L'impression à Dubai [F.P. BOS et al. 2022]

En Europe également, on retrouve déjà des maisons imprimées, notamment une maison à Beckum qui est le premier immeuble résidentiel en Allemagne imprimé en 3D. Cette maison a été imprimée sur site. Elle a deux étages avec une aire de 80 m² par étage et a été conçue pour une durée de vie d'au moins 50 ans. Pour la réalisation de ce projet, une imprimante de type portative a été utilisée. Les murs imprimés étaient creux à l'intérieur et ont été remplis avec un mélange isolant [F.P. BOS et al. 2022] [p. p. M. W. 3D NATIVES 2020]. Cette impression à Beckum est illustrée sur les FIGURES 2.6 et 2.7.



FIGURE 2.6 – La maison imprimée à Beckum [F.P. BOS et al. 2022]



FIGURE 2.7 – Le site d'impression à Beckum [F.P. BOS et al. 2022]

En 2016, pour la première fois, un pont a été imprimé. Les ponts imprimés à l'heure actuelle sont principalement des petites passerelles pour piétons [p. p. P. G. 3D NATIVES 2021]. Un exemple se trouve à Venise. Ce projet, dont le nom est *The Striatum*, est une passerelle piétonne multi-pattes, avec une portée maximale de 15,1 m et une hauteur de 3,5 m. Elle consiste en 53 parties qui ont été imprimées et ensuite assemblées. Avec 58 km, la longueur totale du chemin d'impression est impressionnante et la vitesse maximale d'impression pour ce projet était de 250 mm par seconde (FIGURES 2.8 et 2.9) [F.P. BOS et al. 2022]. D'autres exemples de ponts imprimés peuvent être trouvés à Madrid ou aux Pays-Bas [p. p. P. G. 3D NATIVES 2021].



FIGURE 2.8 – Passerelle *The Striatum* à Venise [F.P. BOS et al. 2022]



FIGURE 2.9 – Assemblage sur site de la passerelle *The Striatum* [F.P. BOS et al. 2022]

L'impression 3D est une technique qui peut être utilisée pour les deux situations, sur site ou hors site dans un environnement contrôlé. HAMIDI et al. [HAMIDI et ASLANI 2019] supposent que l'impression 3D va évoluer dans deux directions : la fabrication de

grands éléments sur site et la fabrication d'éléments avec une haute résolution dans un environnement plus contrôlé hors site.

2.1.5 Propriétés à l'état frais du béton imprimé

Un béton doit avoir des propriétés bien spécifiques pour pouvoir être imprimé, et le développement de bétons appropriés est un des défis actuels. En effet, le béton mis en place par l'imprimante doit être capable de soutenir sa propre masse ainsi que la masse des couches supérieures imprimées par la suite. D'autre part, une adhérence correcte entre deux couches consécutives est également requise ce qui signifie que la prise du matériau ne peut pas avoir lieu trop tôt. De plus, le matériau doit être suffisamment fluide pour pouvoir être pompé dans l'imprimante [SESETTI, LALITHYA et KUMAR 2022].

Il est important de noter que les matériaux utilisés et leur mélange ainsi que les différents paramètres liés à l'impression auront une grande influence sur les propriétés du béton, que ce soit à l'état frais ou à l'état durci [J. ZHANG et al. 2019]. Des paramètres d'impression qui doivent être contrôlés sont par exemple la vitesse d'impression, la hauteur à laquelle se trouve la buse au moment de l'impression, le débit d'extrusion ou encore le temps qui s'écoule entre le dépôt de deux couches successives. De plus, l'environnement dans lequel l'impression a lieu joue également un rôle important : la température, l'humidité, et, dans le cas d'une impression sur site, la vitesse du vent, peuvent également avoir une grande influence sur la qualité [F.P. BOS et al. 2022].

Afin d'évaluer la qualité d'impression, différents paramètres doivent être pris en compte. Tout d'abord, il faut que la surface imprimée soit sans défaut. Des défauts pourraient par exemple être causés par une mauvaise cohésion ou une raideur excessive du béton. De plus, d'autres conditions pour une bonne qualité d'impression sont la conformité et la cohérence des dimensions. Le critère de conformité des dimensions est atteint lorsque la largeur des couches imprimées se trouve dans l'intervalle prédéfini pour la largeur cible. Pour avoir une cohérence des dimensions, il faut que la largeur de la couche reste similaire partout pour une couche imprimée. Finalement, une autre propriété requise est la stabilité de forme [J. ZHANG et al. 2019]. La stabilité de forme est la capacité de la couche de béton extrudé de maintenir une section transversale proche de la section transversale de la buse. La stabilité de forme peut dépendre de la vitesse d'impression et est surtout critique lorsque des parties curvilignes sont imprimées. Dans ce cas, plus de béton est déposé à l'intérieur de la courbe qu'à l'extérieur et des fissures peuvent apparaître sur le côté extérieur de la courbe. C'est pourquoi des limitations sur le rayon de courbure sont souvent imposées pour que celui-ci ne devient pas trop petit [REHMAN et KIM 2021]. Dans le cas où des conditions de qualité d'impression ne sont pas vérifiées, il faut soit ajuster les paramètres d'impression, soit ajuster le mélange, par exemple en ajoutant des additions minérales ou en changeant le dosage des adjuvants [J. ZHANG et al. 2019].

Une autre notion importante est celle de la fenêtre d'imprimabilité qui est définie comme le temps le plus long pendant lequel le béton peut être imprimé en gardant une qualité d'impression acceptable. De plus, il faut faire attention à la limite de blocage définie comme le temps le plus long que le béton peut rester dans la buse de l'imprimante sans la bloquer [J. ZHANG et al. 2019].

Selon plusieurs études, les trois propriétés essentielles pour l'impression 3D sont la pompabilité, l'extrudabilité et la constructibilité :

- Un béton pompable est un béton facilement transportable de la pompe vers la buse de l'imprimante. La composition ainsi que le malaxage vont influencer la pompabilité du béton. S'ils sont inappropriés, des problèmes comme des blocages à cause d'une ségrégation de particules peuvent avoir lieu. Pour être facilement pompable, il faut que le béton forme une couche de lubrification dans la conduite qui constitue une couche à faible viscosité [HAMIDI et ASLANI 2019].
- Un béton extrudable est un béton capable de passer continûment à travers de la buse de l'imprimante, sans blocage ou ségrégation [ABDELOUHAB 2022]. Comme pour la propriété de pompabilité, l'extrudabilité du béton dépend également de sa capacité de former une couche de lubrification [HAMIDI et ASLANI 2019]. Il y a des conditions qui doivent être remplies afin de qualifier l'extrudabilité comme acceptable. Premièrement, il faut que le mortier puisse être extrudé continûment à travers de la buse, avec une bonne qualité de surface de la couche obtenue. De plus, on ne retrouve pas de discontinuité ou rupture dans la couche imprimée. Le deuxième critère concerne la largeur de la couche imprimée : il faut que l'erreur sur la largeur ne soit pas plus grande que 10 % du diamètre de la buse afin de garantir une bonne stabilité de forme [ZOU, XIAO, DING et al. 2021].
- Après l'extrusion, il faut que le béton soit capable de maintenir sa forme et d'être empilé couche par couche sans qu'un effondrement ait lieu. Ces propriétés sont regroupées sous le terme de constructibilité [ABDELOUHAB 2022]. Pour vérifier ces critères de constructibilité, il faut une résistance au jeune âge plus élevée que pour les méthodes de construction traditionnelles [DING, XIAO, QIN et al. 2020].

En effet, une résistance au jeune âge élevée est essentielle afin d'éviter une rupture prématurée de la pièce imprimée. À cause de l'absence de coffrage, le béton imprimé doit porter son propre poids ainsi que le poids des couches supérieures dès le début. C'est pourquoi il est important d'étudier l'évolution de la résistance du béton imprimé au jeune âge [DING, XIAO, QIN et al. 2020].

Quelques notions de rhéologie

Les mortiers et bétons frais sont classifiés comme des fluides de Bingham, et leur comportement peut être décrit grâce au modèle de Bingham :

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma \quad (2.1)$$

avec τ représentant la contrainte de cisaillement, γ le taux de cisaillement, τ_0 le seuil de cisaillement et μ la viscosité plastique. Ce modèle souligne que pour déformer le béton ou le mettre en mouvement, une certaine contrainte de cisaillement doit d'abord être appliquée. Une fois cette contrainte appliquée atteint le seuil de cisaillement τ_0 , le mouvement est initié et la courbe rhéologique (diagramme $\tau - \gamma$) est linéaire [COURARD 2020] [NODEHI et al. 2022] [REHMAN et KIM 2021].

En fonction si le béton est encore au repos ou déjà en mouvement, on distingue entre le seuil de cisaillement statique et le seuil de cisaillement dynamique. Le seuil de cisaillement statique est la contrainte de cisaillement nécessaire pour mettre le béton au repos en mouvement. Ensuite, une fois l'écoulement est établi, la force nécessaire pour maintenir ce mouvement correspond au seuil de cisaillement dynamique. Lorsque la contrainte de cisaillement n'est plus appliquée, l'écoulement du béton s'arrête, la floculation des particules commence et le béton se reconstruit. Après un certain temps nécessaire pour la

restructuration du béton, le seuil de cisaillement statique doit à nouveau être dépassé pour remettre le béton en écoulement. Ce phénomène est connu sous le nom de thixotropie. Le taux d'augmentation du seuil de cisaillement statique avec le temps lors de cette restructuration est appelé taux de structuration [REHMAN et KIM 2021] [COURARD 2020].

Les propriétés rhéologiques déterminent la pompabilité, l'extrudabilité et la constructibilité du béton. Le seuil de cisaillement dynamique ainsi que la viscosité jouent surtout un rôle pour la pompabilité et l'extrudabilité alors que le seuil de cisaillement statique, la thixotropie et le taux de structuration influencent fortement la constructibilité [REHMAN et KIM 2021].

Propriétés rhéologiques nécessaires d'un béton imprimable

La difficulté principale des bétons imprimables est que des propriétés rhéologiques différentes sont requises avant et après l'extrusion puisque le béton doit être suffisamment maniable pour être pompé et extrudé aisément mais également suffisamment ferme pour rester stable après l'extrusion. De plus, les propriétés rhéologiques requises pour un béton imprimable diffèrent de celles d'un béton classique. Par exemple, un béton imprimable présente en général un affaissement moins important qu'un béton classique ce qui est nécessaire pour remplir le critère de constructibilité [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022].

De manière générale, pour que le béton imprimable satisfasse à la fois les conditions d'extrudabilité et de constructibilité, les propriétés rhéologiques du béton doivent remplir les trois critères suivants :

1. Un seuil de cisaillement dynamique et une viscosité qui sont suffisamment faibles pour permettre un pompage et une extrusion aisés,
2. Un seuil de cisaillement statique élevé pour assurer la constructibilité et empêcher un effondrement de la pièce en cours d'impression,
3. Une bonne thixotropie afin d'obtenir le comportement différent avant et après l'extrusion et de prolonger le temps pendant lequel le mélange reste imprimable [ZOU, XIAO, DUAN et al. 2021].

REHMAN et al. [REHMAN et KIM 2021] ont comparé les propriétés rhéologiques de différents mélanges cimentaires utilisés pour l'impression 3D qu'on peut trouver dans la littérature. Ils notent que le seuil de cisaillement statique se trouve en général entre 0,2 kPa et 4 kPa alors que le seuil de cisaillement dynamique est en général compris entre 0,1 kPa et 0,7 kPa. En ce qui concerne la viscosité, celle-ci se trouve entre 1,6 Pa·s et 5,8 Pa·s pour la plupart des mélanges [REHMAN et KIM 2021].

Les propriétés rhéologiques du béton ne dépendent non seulement de la composition mais également du malaxage. Cependant, il faut savoir qu'il n'y a pas de procédure de malaxage standardisée pour le béton pour impression 3D. Pour cette raison, il est important d'indiquer non seulement la composition du béton utilisé, mais également la procédure de malaxage appliquée [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022]. De plus, une grande variété d'imprimantes 3D avec des fonctionnements et caractéristiques différents peut être trouvée à l'heure actuelle dans les différents laboratoires et chantiers. C'est pourquoi il est important de noter que la composition du béton doit être adaptée à l'imprimante utilisée :

il est possible qu’une composition qui donne des bons résultats avec une imprimante ne se laisse pas imprimer avec une autre imprimante [REHMAN et KIM 2021].

Composition d’un béton imprimable

Dans les bétons imprimables, on retrouve en général une quantité élevée de ciment qui est nécessaire afin d’obtenir les propriétés requises pour l’impression [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022]. En effet, le ciment est un matériau thixotropique. Cette propriété est importante si on veut permettre une extrusion aisée du matériau mais en même temps assurer qu’il reste en forme après l’extrusion [HAMIDI et ASLANI 2019]. Cependant, la teneur élevée en ciment conduit à une augmentation de la chaleur d’hydratation ce qui peut poser des problèmes tels qu’un blocage de la buse ou encore un retrait de séchage plus élevé [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022]. Si on utilise moins de ciment dans la composition, cela peut avoir des effets négatifs tels qu’un long temps de prise et une faible résistance au jeune âge. ŞAHIN et al. [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022] notent que pour ces raisons, l’ajout d’additions minérales dans la composition est recommandé.

La teneur élevée en ciment dans le mélange cause non seulement des problèmes à cause de l’augmentation de la chaleur d’hydratation mais également des problèmes environnementaux, puisque la production de ciment est à l’origine de quantités considérables de CO₂. C’est pour cela qu’on est actuellement à la recherche de liants alternatifs qui pourraient substituer au moins une partie du ciment dans la composition des mortiers et bétons imprimables. ŞAHIN et al. [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022] constatent qu’un tel liant alternatif doit idéalement avoir les quatre propriétés suivantes :

1. Réduire le retrait,
2. Réduire la chaleur d’hydratation,
3. Diminuer le temps de prise,
4. Augmenter la résistance au jeune âge [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022].

Les substituts au clinker sont par exemple les cendres volantes, le laitier de haut-fourneau, la poudre de calcaire ou encore la fumée de silice [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022]. L’utilisation de ces additions minérales a évidemment des effets sur les propriétés rhéologiques du matériau ainsi que sur la constructibilité. ŞAHIN et al. [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022] ont résumé l’influence de différentes additions dans la TABLE 2.1 suivante :

Addition	Maniabilité	Seuil de cisaillement	Viscosité	Résistance au jeune âge	Constructibilité
Cendres volantes	↗	↘	↘	↗	↘
Fumée de silice	↘	↗	↗	↗	↗
Métakaoline	↘	↗	↗	↗	↗

TABLE 2.1 – Effets de différentes additions minérales [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022]

Concernant les granulats utilisés dans un béton imprimable, ceux-ci sont en général plus petits que ceux qu’on retrouve dans un béton classique. Cela est nécessaire afin d’éviter tout blocage au niveau de la buse de l’imprimante. Cependant, l’utilisation de granulats plus fins a comme conséquence négative que le retrait thermique ainsi que le retrait de séchage deviennent plus élevés. L’utilisation de granulats plus gros aurait l’effet bénéfique de réduire la quantité de ciment utilisée et donc également la chaleur d’hydratation et

le retrait. Par contre, des granulats plus gros auraient une influence négative sur la maniabilité et surtout sur la pompabilité. Pour pouvoir utiliser de tels granulats, d'autres systèmes de pompages que ceux actuellement utilisés devraient être mis en place [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022].

La FIGURE 2.10 montre une comparaison du pourcentage des différents matériaux (en termes de volume) entre la composition d'un béton classique, la composition d'un béton auto-compactant et la composition d'un béton pour impression 3D [REHMAN et KIM 2021].

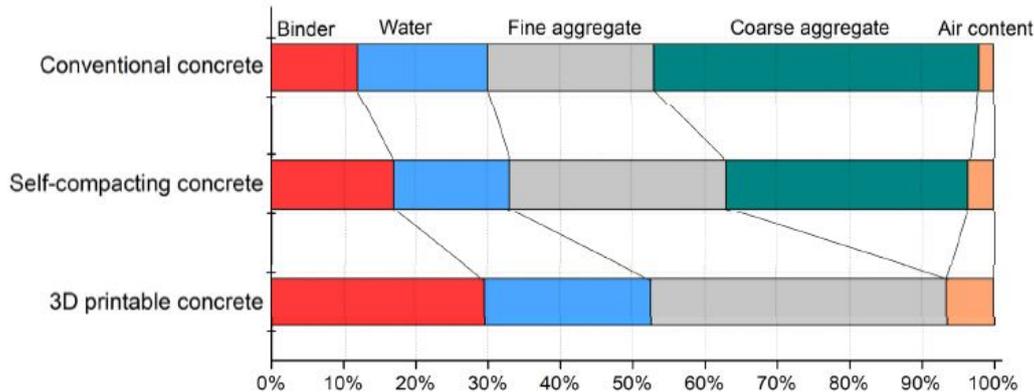


FIGURE 2.10 – Comparaison des compositions de différents types de bétons [REHMAN et KIM 2021]

Dans la composition d'un mortier ou béton imprimable, on retrouve également des adjuvants qui sont nécessaires pour obtenir les propriétés rhéologiques désirées. En effet, puisque les propriétés rhéologiques requises avant et après l'extrusion sont contradictoires, des adjuvants sont indispensables pour fournir au mélange toutes les propriétés nécessaires pour l'impression. La composition du béton imprimable varie d'un projet de recherche à l'autre, et souvent les détails du mélange ne sont pas partagés avec le public. Néanmoins, il est connu que les adjuvants les plus utilisés dans les différentes compositions de bétons imprimables sont des superplastifiants, des viscosants ou encore des adjuvants dont le but est de contrôler la prise [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022].

Des superplastifiants peuvent être trouvés dans quasi toutes les compositions de bétons imprimables. Ils diminuent le seuil de cisaillement et ont le but de faciliter l'extrusion et d'améliorer la qualité d'impression [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022]. De plus, ils permettent d'augmenter la résistance à la compression de la pièce durcie. Par contre, s'ils sont ajoutés en grandes quantités, ils peuvent avoir l'effet négatif de réduire la constructibilité [J. ZHANG et al. 2019].

Souvent, des viscosants sont utilisés. Ceux-ci augmentent la cohésion ainsi que la viscosité et ont pour but d'aider le matériau à tenir sa forme après impression. L'ajout du viscosant a donc un effet bénéfique sur la constructibilité [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022].

Le troisième type d'adjuvants utilisés dans les compositions sont les accélérateurs de prise dont le but est de diminuer le temps de prise du béton imprimé afin qu'il soit capable de porter le poids des couches supérieures. Cependant, deux types de problèmes peuvent survenir en utilisant ce type d'adjuvant : un blocage au niveau de la buse ainsi que l'apparition de joints froids, c'est-à-dire une adhérence diminuée entre deux couches

successives. Ces problèmes peuvent être évités en n'injectant l'accélérateur pas directement dans le mélange, mais en l'ajoutant au niveau de la tête d'imprimante [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022]. En effet, le fait d'ajouter l'accélérateur au niveau de la tête d'imprimante permet d'améliorer la constructibilité du mortier sans affecter sa pompabilité [XIAO et al. 2020].

2.1.6 Propriétés à l'état durci du béton imprimé

Concernant les propriétés à l'état durci du béton imprimé, le mode de fabrication par impression 3D conduit à quelques différences par rapport au béton fabriqué selon les techniques traditionnelles. En effet, les différences principales sont les interfaces entre les couches déposées qui auront une influence sur les propriétés mécaniques ainsi que sur la durabilité. De plus, elles conduisent à une anisotropie dans l'élément en béton, ce qui est également une différence importante entre le béton imprimé et le béton coulé [DE SCHUTTER et al. 2018]. Par conséquent, la résistance en compression ainsi que la résistance en flexion vont varier en fonction de la direction de la charge appliquée par rapport à la direction des couches [DING, XIAO, ZOU et al. 2020].

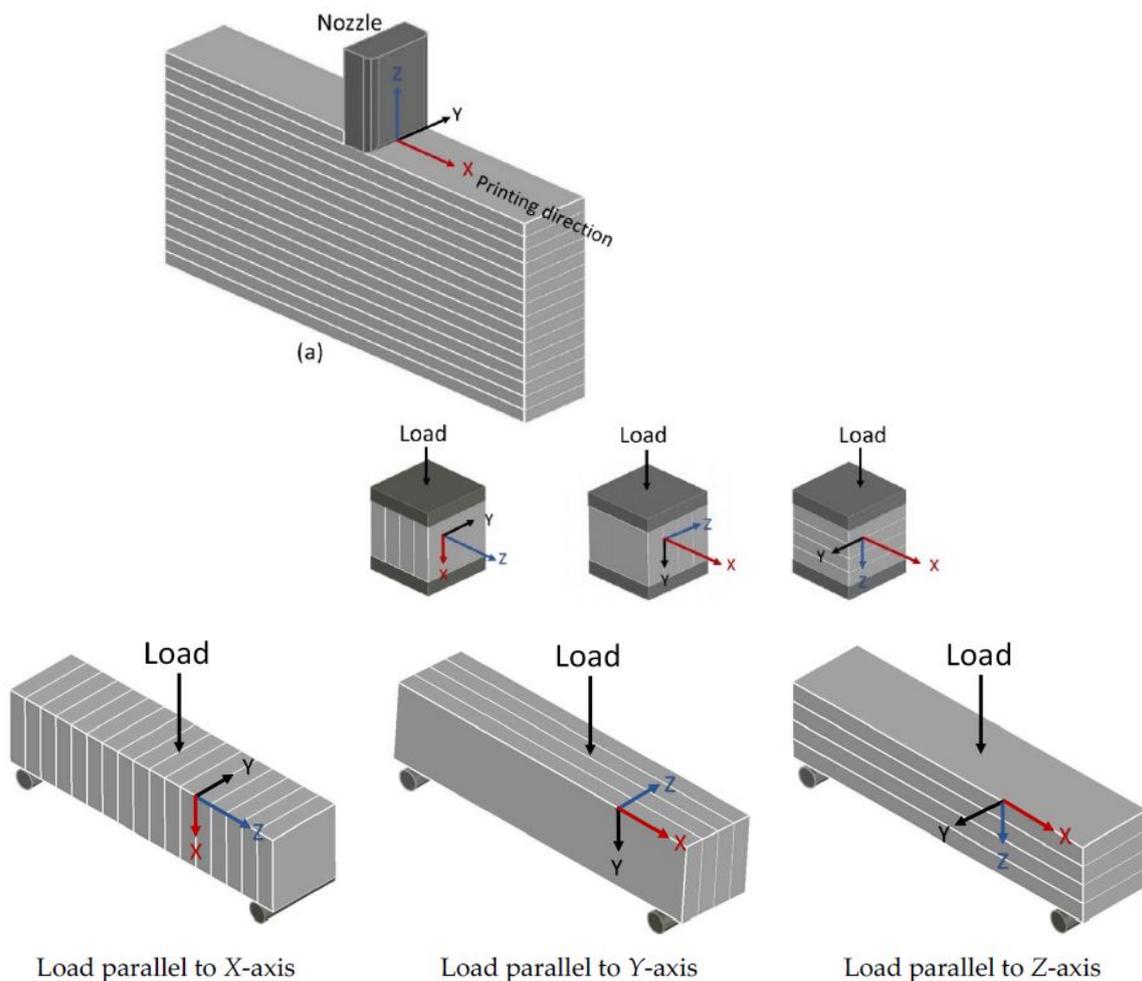


FIGURE 2.11 – Directions des forces appliquées par rapport au sens des couches [REHMAN et KIM 2021]

REHMAN et al. [REHMAN et KIM 2021] ont rassemblé de nombreuses recherches qui com-

parent les résistances mécaniques des éléments imprimés aux résistances mécaniques des éléments moulés. De plus, dans ces recherches, l'anisotropie des éléments imprimés a été étudiée. La FIGURE 2.11 montre les trois différentes directions dans lesquelles les résistances des éléments imprimés ont été testées. Dans la suite, la résistance en compression des éléments moulés est notée C_c alors que les résistances en compression des éléments imprimés, mesurées selon les axes X, Y et Z indiqués à la FIGURE 2.11, sont notées C_x , C_y et C_z . Dans la plupart des recherches prises en compte, la résistance en compression mesurée sur les éléments imprimés était inférieure à celle des éléments moulés quelle que soit la direction testée. Dans le but d'évaluer l'anisotropie, REHMAN et al. [REHMAN et KIM 2021] ont divisé les résistances en compression selon les différents axes C_x , C_y et C_z par la résistance en compression du béton moulé C_c . La FIGURE 2.12 montre les résultats obtenus pour les grandeurs C_x/C_c , C_y/C_c et C_z/C_c dans des différentes études [REHMAN et KIM 2021].

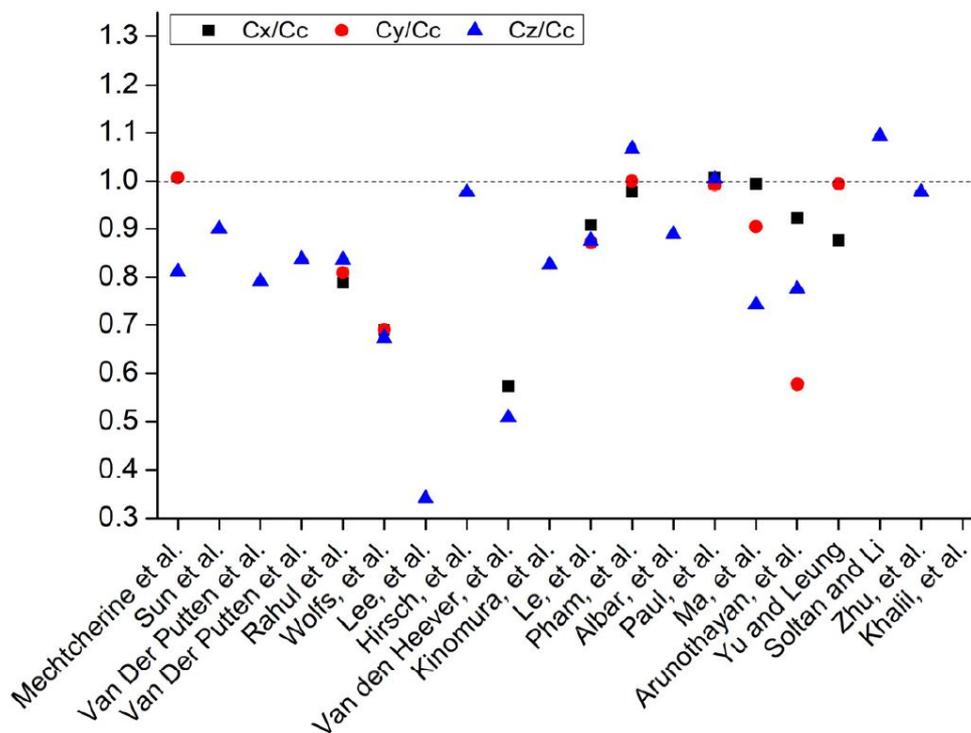


FIGURE 2.12 – Anisotropie de la résistance en compression des éléments imprimés en 3D [REHMAN et KIM 2021]

Dans la plupart des cas, des valeurs entre 0,9 et 1 ont été trouvées pour C_x/C_c et C_y/C_c ainsi que des valeurs entre 0,8 et 0,9 pour C_z/C_c . Cela signifie que lorsque la charge est appliquée selon la direction Z, la résistance en compression de la pièce imprimée est inférieure à ce qu'elle serait dans le cas d'une charge appliquée selon la direction X ou Y. Il est important de prendre en compte l'anisotropie car la direction de sollicitation de l'élément imprimé dépend de son utilisation. Par exemple, dans le cas d'un mur imprimé ou d'une colonne imprimée, la charge s'appliquera principalement selon la direction Z alors que dans le cas de bancs ou escaliers imprimés, elle s'appliquera principalement selon la direction Y [REHMAN et KIM 2021].

REHMAN et al. [REHMAN et KIM 2021] ont non seulement comparé les résistances en

compression obtenues dans différentes études mais également les résistances en flexion, pour lesquelles une anisotropie est également observable. Les axes sont à nouveau définis comme montré à la FIGURE 2.11. Dans la suite, la résistance en flexion des éléments moulés est notée F_c alors que les résistances en flexion des éléments imprimés, mesurées selon les axes X, Y et Z, sont notées F_x , F_y et F_z . De manière générale, la plupart des études indiquent que la résistance en flexion des échantillons imprimés est inférieure à celle des échantillons moulés dans le cas d'une charge appliquée selon la direction X. Par contre, dans le cas d'une charge appliquée selon la direction Y ou Z, la résistance en flexion des éléments imprimés est similaire ou même supérieure à celle des échantillons moulés. À nouveau, la résistance des éléments imprimés est divisée par celle des éléments moulés afin d'évaluer l'anisotropie. Les résultats obtenus dans les différentes études prises en compte sont représentés à la FIGURE 2.13. Dans la plupart des études, des valeurs entre 0,5 et 0,7 ont été trouvées pour F_x/F_c , des valeurs entre 1,1 et 1,2 pour F_y/F_c et des valeurs entre 1 et 1,1 pour F_z/F_c [REHMAN et KIM 2021].

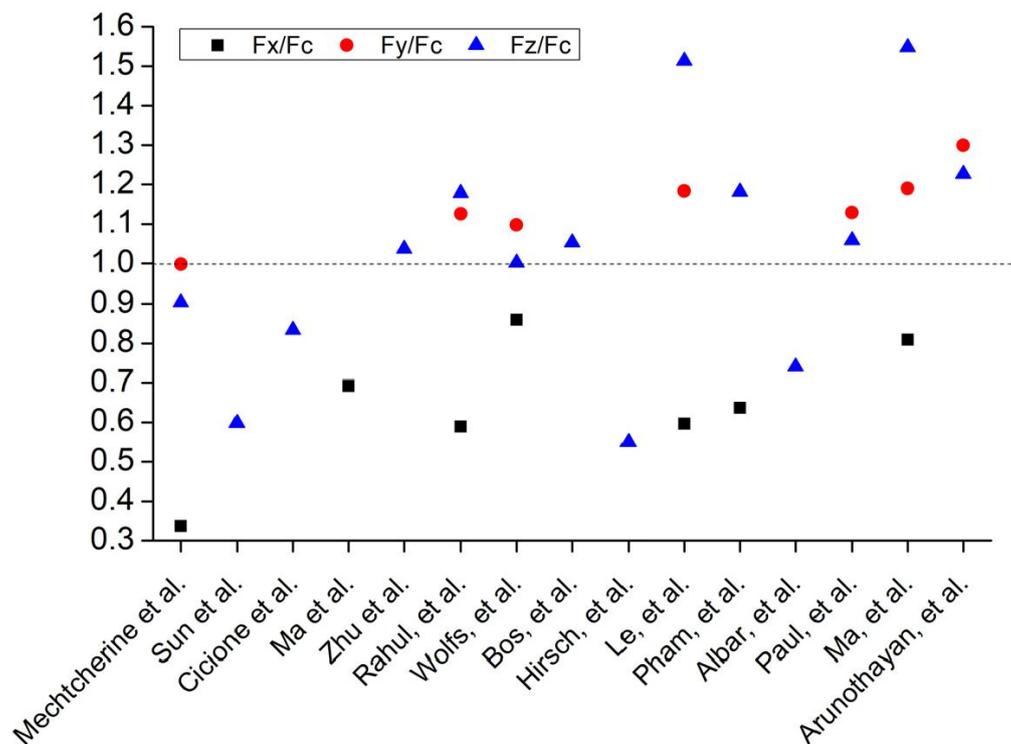


FIGURE 2.13 – Anisotropie de la résistance en flexion des éléments imprimés en 3D [REHMAN et KIM 2021]

Un paramètre qui a une grande influence sur les propriétés du béton imprimé à l'état durci est la force d'adhésion entre les différentes couches. Cette force d'adhésion influence fortement la résistance à la traction et est dépendante du temps de repos : elle diminue lorsque le temps de repos augmente, le temps de repos étant défini comme le temps entre le malaxage et l'impression. En outre, plus on a des vides entre les couches, plus la force d'adhésion diminue. Le mode de fabrication par couches induit forcément des vides, ce qui va affaiblir la résistance. La quantité de vides créés dépend entre autre de la vitesse d'impression : plus la vitesse d'impression est élevée, plus on retrouve de vides [J. ZHANG et al. 2019]. La création des vides est également dépendante de la forme de la buse. Si la buse est rectangulaire, la surface de contact entre la couche imprimée et la couche

en-dessous est plus grande que ce qui serait le cas avec une buse ronde. En effet, une buse ronde va créer des couches de béton avec une section elliptique ce qui va conduire à plus de vides entre deux couches adjacentes [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023]. Le temps de repos a surtout une influence lorsqu'on utilise de grandes quantités de béton pour une impression : Avec le temps, la réaction d'hydratation du béton progresse ce qui peut avoir comme conséquence que la qualité des couches supérieures est moins bonne que celle des couches inférieures [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023]. L'interpénétration des couches est un autre paramètre ayant une influence significative sur les propriétés à l'état durci de la pièce imprimée. Ce paramètre dépend de la hauteur de la buse par rapport à son diamètre. Lorsque la hauteur de la buse est plus faible que son diamètre, la couche en cours d'impression est forcément écrasée dans la couche précédente.

L'adhérence entre les couches dépend également du temps qui s'écoule entre le dépôt de deux couches successives. Ce temps dépend de la vitesse ainsi que du chemin d'impression. Si ce chemin est trop long, des joints froids vont se former ce qui a une influence négative sur l'adhérence entre les couches ainsi que sur les propriétés mécaniques. On retrouve dans ce cas des propriétés mécaniques plus anisotropes et un comportement plus fragile de la structure [HAMIDI et ASLANI 2019].

Le retrait peut poser un autre problème dans le cas du béton imprimé. En effet, le retrait peut non seulement provoquer des fissures, mais est également problématique pour la précision et stabilité dimensionnelle de la pièce imprimée [HAMIDI et ASLANI 2019]. Les bétons pour impression contiennent en général une quantité élevée de ciment ce qui induit un retrait plus élevé [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022]. De plus, un des grands avantages de la fabrication par impression 3D est qu'un coffrage n'est plus nécessaire. Cependant, le coffrage protège le béton de l'environnement extérieur lors de sa cure. Sans coffrage, la surface exposée de l'élément est plus grande, ce qui, en combinaison avec le rapport eau/ciment plus faible qu'on retrouve dans un béton imprimable, va augmenter le risque de formation de fissures à cause du retrait [HAMIDI et ASLANI 2019].

Les exigences de durabilité sont une raison pour laquelle il est important de contrôler les fissures dues au retrait. Différentes possibilités existent pour diminuer et contrôler le retrait, comme mentionné par HAMIDI et al. [HAMIDI et ASLANI 2019] : on peut par exemple inclure des fibres, augmenter le rapport sable/ciment ou utiliser des additions comme les cendres volantes. De plus, dans ce contexte, DE SCHUTTER et al. [DE SCHUTTER et al. 2018] soulignent l'importance d'une composition appropriée et de mesures efficaces lors du durcissement.

2.1.7 Avantages et opportunités de l'impression 3D béton

La fabrication additive qui a déjà de nombreuses applications dans d'autres domaines que la construction, par exemple dans le secteur biomédical ou encore dans le secteur aérospatial, est encore à ses débuts dans le secteur de la construction. Cependant, à cause de ses nombreux avantages, elle est de plus en plus considérée dans ce secteur également [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023]. Parmi les avantages, on peut citer plus de liberté de forme et plus de sécurité sur chantier. En effet, grâce à l'impression 3D, on est capable de créer de nouvelles géométries et des formes irrégulières sans avoir besoin d'une grande quantité de coffrages spéciaux. Le temps ainsi que le coût de construction sont supposés diminuer et les déchets de construction peuvent être réduits. Une réduction des déchets de construction est non seulement bonne pour l'environnement, mais conduit

également à des coûts de matériaux réduits [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023]. En outre, moins de matériau est nécessaire vu que la production par impression 3D permet de placer le matériau uniquement aux endroits où il est structurellement ou fonctionnellement nécessaire [DE SCHUTTER et al. 2018].

De nombreux avantages de l'impression 3D béton sont listés par BAIGARINA et al. [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023] :

- Cette technique pourrait augmenter la productivité puisque le robot peut théoriquement travailler 24 heures par jour. De plus, l'utilisation d'un robot pour l'impression permettrait de minimiser les erreurs par rapport aux techniques classiques effectuées manuellement [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023].
- Il est facilement possible d'obtenir des formes curvilignes grâce à une fabrication par impression 3D. Des formes curvilignes sont souvent favorables d'un point de vue structurel, mais très rarement utilisées car leur fabrication nécessite des coffrages spéciaux pour les méthodes de construction traditionnelles. Par contre, dans la fabrication par impression 3D, on n'a plus besoin de coffrage et la production des éléments curvilignes est aussi facile que celle des éléments rectilignes [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023].
- De plus, la fabrication additive est une méthode de construction qui pourrait être utilisée dans des environnements hostiles, comme par exemple des zones qui ont été affectées par des catastrophes naturelles ou même sur la Lune ou sur Mars [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023]. En effet, à l'heure actuelle, la NASA et l'ESA font des recherches sur l'utilisation d'imprimantes 3D pour des constructions sur la Lune ou sur Mars [HAMIDI et ASLANI 2019].

Un autre avantage potentiel est mentionné par SESETTI et al. [SESETTI, LALITHYA et KUMAR 2022] : l'impression 3D peut être une technique utile dans des situations de pandémie. En effet, en utilisant une imprimante 3D au lieu d'une technique de construction classique, beaucoup moins d'ouvriers sont nécessaires sur le chantier.

ŞAHIN et al. [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022] relèvent également un des avantages les plus importants de l'impression 3D par rapport aux techniques de construction traditionnelles : la réduction des coffrages. En effet, les coffrages ont des impacts négatifs sur l'environnement, mènent à un gaspillage de matériau et peuvent entraîner des retards de construction. De plus, ils sont associés à des coûts élevés en terme de matériau et de main d'oeuvre, et souvent les coffrages constituent une grande partie du coût total d'une construction en béton [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022]. Contrairement aux méthodes traditionnelles, l'impression 3D béton nécessite moins de coffrage, voire pas de coffrage, ce qui réduit considérablement les problèmes liés au coffrage mentionnés ci-dessus. Cette réduction de coffrages est surtout un avantage dans le cas de structures complexes ou personnalisées où des coffrages spéciaux sont nécessaires dans les méthodes de construction traditionnelles [DE SCHUTTER et al. 2018]. La fabrication par impression 3D permet donc aux architectes de concevoir des designs beaucoup plus complexes et personnalisés [HAMIDI et ASLANI 2019]. En général, on peut dire que plus la structure est complexe, plus la fabrication par impression 3D présente des avantages par rapport aux méthodes traditionnelles [DE SCHUTTER et al. 2018].

Un autre avantage potentiel de l'impression 3D est que cette technologie pourrait être une solution pour lutter contre la crise du logement puisqu'elle permettrait une construction

plus rapide et moins chère. Une entreprise qui a développé des imprimantes 3D dans ce but est l'entreprise italienne WASP : elle espère construire des maisons respectueuses de l'environnement grâce à l'impression 3D tout en utilisant des matériaux locaux et une source d'énergie verte, comme l'énergie solaire, éolienne ou hydraulique [p. p. M. W. 3D NATIVES 2018].

L'impression 3D dans le secteur de la construction permettrait donc de réduire les déchets, le coût et le temps de construction. ZHANG et al. [J. ZHANG et al. 2019] indiquent que des études ont montré que cette technologie serait capable de réduire les déchets de construction entre 30 % et 60 %, le coût entre 50 % et 80 % et le temps de production entre 50 % et 70 %. HAMIDI et al. [HAMIDI et ASLANI 2019] mentionnent qu'il serait possible de réduire l'utilisation de matières premières jusqu'à 30 %. Cependant, il faut aussi noter qu'il est difficile d'estimer le coût exact d'une structure imprimée à l'heure actuelle et de quantifier la diminution du prix puisqu'il n'existe que quelques projets pilotes et la technologie n'est pas encore bien établie dans le secteur. L'optimisation structurelle et par conséquent la réduction de matériaux utilisés ainsi que la réduction des coffrages vont tous avoir un effet favorable sur le prix. Par contre, selon la composition utilisée, il se peut que des additions très fines et des adjuvants soient nécessaires ce qui fait augmenter le prix [DE SCHUTTER et al. 2018].

Enfin, ZHANG et al. [J. ZHANG et al. 2019] mentionnent une possibilité de l'impression 3D classique avec des filaments (par exemple des thermoplastiques) dans le secteur de la construction : cette technique pourrait être utilisée pour réparer des structures en béton endommagées. Pour cela, la zone endommagée est d'abord photographiée et mesurée pour pouvoir créer un modèle 3D. Sur base de ce modèle, on peut alors imprimer un moule qui a la géométrie de la zone endommagée et dans lequel on coule du béton. Une fois ce béton durci, on peut le démouler et le coller sur la zone endommagée pour la réparer [J. ZHANG et al. 2019].

2.1.8 Recherches actuelles et futures

Tous les avantages listés montrent que l'impression 3D a un grand potentiel dans le domaine de la construction. Cependant, il y a également de nombreuses limitations qui actuellement empêchent une large diffusion de cette technologie. Pour que l'impression 3D puisse être couramment utilisée dans le secteur de la construction et développer tout son potentiel, des recherches approfondies sont encore nécessaires. En effet, les défis actuels sont par exemple les propriétés du béton requises à l'état frais pour pouvoir l'imprimer, la durabilité, le contrôle du retrait ou encore l'obtention de propriétés mécaniques suffisantes à l'état durci [HAMIDI et ASLANI 2019].

Surtout si on veut fabriquer des éléments porteurs par impression, il y a encore de nombreux autres problèmes et défis au niveau de la conception structurelle. De tels défis sont par exemple le calcul et l'inclusion d'un renforcement minimal, des incertitudes sur les propriétés du matériau qui sont affectées par le processus d'impression et évidemment la conformité aux normes et codes de calcul [F.P. BOS et al. 2022].

Établir des normes et règles

Pour que l'impression 3D béton puisse s'établir rapidement dans le secteur de la construction comme technique couramment utilisée, il faut d'abord augmenter sa fiabilité. Pour

cela, il est nécessaire de contrôler tous les paramètres inclus dans le processus d'impression ainsi que de prédire le comportement mécanique de la pièce imprimée [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023].

Afin de rendre l'impression 3D fiable, des recherches sont nécessaires et des règles pour les pièces imprimées en 3D doivent être établies. De plus, des normes d'essai des matériaux, spécifiquement pour les bétons imprimables, doivent être ajustées dans le but de diminuer les incertitudes liées au matériau [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023]. Un projet actuellement en cours sur ce sujet est le projet BEXTRUS qui est réalisé en collaboration entre BuildWise (cstc), INISMa et l'Université de Liège. Un des objectifs principaux de ce projet est "l'établissement d'une méthodologie / de lignes directrices pour tester l'aptitude d'une formulation à l'impression 3D par extrusion" [ABDELOUHAB et ARROTIN 2022].

En effet, surtout en Europe, il y a des normes strictes sur les matériaux et processus de construction à respecter. Dès lors, vu qu'il n'y a pas de normes établies pour le procédé de fabrication par impression 3D, il est quasi impossible pour cette technologie de devenir utilisable au quotidien dans le secteur de la construction. Pour le développement ultérieur de l'impression 3D à grande échelle, il est donc d'une grande importance que de telles normes adaptées soient établies [HAMIDI et ASLANI 2019].

Un problème avec les normes actuelles pour le dimensionnement et la durabilité est qu'elles sont établies pour un béton considéré comme homogène. Cependant, dans le cas du béton imprimé, les interfaces entre les couches sont des zones d'une moindre qualité et on peut retrouver un comportement anisotrope. L'influence de la structure en couches devrait donc être prise en compte lors du dimensionnement de l'élément [DE SCHUTTER et al. 2018].

Réduire l'impact environnemental

À l'heure actuelle, à cause des problématiques du réchauffement climatique et de l'exploitation excessive des ressources premières, un des objectifs dans le secteur de la construction est de rendre celui-ci plus respectueux de l'environnement. En effet, le secteur de la construction a un impact environnemental très négatif, sachant qu'il est responsable de 40 % de l'énergie consommée dans le monde, 40 % des déchets solides produits, 38 % des gaz à effet de serre libérés et 12 % de l'épuisement de l'eau [DE SCHUTTER et al. 2018]. Dans le secteur de la construction, de très grandes quantités de béton sont utilisées ce qui implique l'utilisation de beaucoup de matières premières ainsi que des émissions significatives de CO_2 . En particulier, la production de ciment Portland est un des plus grands émetteurs de CO_2 du monde [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023]. Lors de la production du ciment Portland, le calcaire (CaCO_3) se décarbonate à des températures proches de $1450\text{ }^\circ\text{C}$ ce qui libère du CO_2 ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). Il est estimé que la production d'une tonne de clinker Portland libère environ une tonne de gaz à effet de serre, dont 60 % viennent du CO_2 échappé lors de la réaction de décarbonatation et 40 % des combustibles brûlés pour atteindre la température de $1450\text{ }^\circ\text{C}$ [CLIMATOSCOPE 2023].

Comme vu précédemment, on retrouve une teneur élevée en ciment dans la composition d'un béton imprimable. C'est pourquoi de nombreuses recherches en cours ont le but de substituer le ciment (complètement ou en partie) et de trouver des liants alternatifs plus respectueux de l'environnement. Les matériaux cimentaires les plus utilisés pour substituer

le ciment Portland sont les cendres volantes et le laitier de haut-fourneau [CLIMATOSCOPE 2023].

D'autres liants alternatifs de plus en plus évoqués sont les géopolymères. Les géopolymères contiennent des cendres volantes ainsi que des activateurs [BAIGARINA, SHEHAB et ALI 2023] [WAN-WENDNER 2023]. Ils ont des propriétés mécaniques supérieures à celles du ciment Portland et sont surtout meilleurs pour l'environnement : on estime qu'ils produisent 80 % d'émissions de CO₂ en moins que le clinker Portland [SESETTI, LALITHYA et KUMAR 2022]. Les géopolymères sont un matériau de construction durable et le béton à base de géopolymères a de bonnes propriétés telle qu'une résistance à la compression élevée ainsi qu'une bonne résistance vis-à-vis des attaques de sulfate ou d'acides. De plus, le retrait de séchage est réduit comparé au clinker Portland. Cependant, le béton à base de géopolymères a jusqu'à présent uniquement été utilisé pour de petits domaines d'applications ce qui signifie que des recherches approfondies sont nécessaires afin d'agrandir ses domaines d'application et de trouver une composition appropriée pour l'impression 3D [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022].

De plus, afin de préserver les ressources naturelles, le recyclage des déchets de construction et de démolition gagne de plus en plus en importance. Par conséquent, de nombreuses recherches actuelles traitent de la substitution des granulats naturels dans le béton par des granulats recyclés. Concernant le béton pour l'impression 3D, des projets de recherche dont le but est de substituer le sable naturel par le sable recyclé sont actuellement en cours, notamment le projet CIRMAP, dans le cadre duquel ce travail de fin d'études est réalisé. Dans ce projet, on vise l'impression 3D de mobilier urbain avec un béton à base de sable recyclé [Yeakleang MUY, HUBERT et COURARD 2023].

Inclure des renforcements en acier

La résistance en traction du béton est faible et sa rupture est fragile ce qui rend nécessaire d'inclure des armatures en acier dans les applications structurales. En effet, la résistance en traction du béton est d'environ 10 % de sa résistance en compression ce qui est assez faible. C'est pourquoi la résistance en traction du béton est souvent négligée lors du dimensionnement. Des armatures sont donc nécessaires pour reprendre les efforts de traction, mais ce n'est pas leur seul rôle. En général, une quantité minimale d'armatures est toujours prévue pour éviter une rupture fragile lors de la fissuration et pour assurer un comportement suffisamment ductile qui permet la redistribution des contraintes et de limiter les déformations ainsi que la largeur des fissures [ASPRONE et al. 2018]. Pour que l'impression 3D béton puisse devenir une alternative aux méthodes de construction traditionnelles pour les éléments porteurs en béton, il est indispensable de trouver des moyens d'inclure le renforcement [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022][F.P. BOS et al. 2022]. C'est pourquoi de nombreuses recherches sont en cours sur différentes méthodes de renforcement possibles.

Premièrement, dans le cas de la technique d'impression *Contour Crafting* où le béton imprimé peut jouer le rôle de coffrage perdu, il est possible d'inclure manuellement des armatures conventionnelles. En effet, dans ce cas, il est possible de placer des armatures horizontales et verticales à la main pour obtenir un renforcement régulier. Cette méthode est par exemple utilisée pour des murs imprimés et a l'avantage d'être facilement applicable et économique. Cependant, il existe encore des incertitudes concernant par exemple l'interface entre le béton imprimé et le béton coulé, le contrôle de l'enrobage du béton ou

encore l'efficacité structurelle [ASPRONE et al. 2018]. Un exemple d'application de cette méthode est le bâtiment de bureaux à Dubai qui a été construit par l'entreprise ApisCor. Dans les murs imprimés pour ce bâtiment, on peut voir des diagonales imprimées à l'intérieur du mur ainsi que des cavités dans lesquelles on retrouve des armatures classiques. Ces cavités servent comme coffrage perdu pour les colonnes coulées en place [F.P. BOS et al. 2022].

Une autre méthode possible qui est compatible avec l'impression 3D béton est le renforcement par fibres. Ces fibres sont ajoutées au mélange, soit pendant le malaxage, soit lors de l'extrusion. En général, des fibres courtes et flexibles peuvent être incorporées directement dans le mélange, alors que des fibres plus longues et plus raides sont plutôt ajoutées lors de l'extrusion pour éviter qu'elles bloquent ou endommagent la buse. Différents types de fibres ont déjà été testés, tels que des fibres en polypropylène, des fibres en acier ou encore des fibres de verre [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022]. Comparé au béton non-renforcé, l'ajout des fibres a l'effet bénéfique d'augmenter considérablement la résistance en flexion du béton. Cependant, des études ont révélé que la plupart des fibres seront orientées dans la direction de l'écoulement ce qui induit une anisotropie dans le béton imprimé. Un autre problème de cette méthode est que les fibres ne sortent pas de la couche de béton imprimée ce qui peut avoir comme conséquence que le béton à l'interface de deux couches a des propriétés moindres [ASPRONE et al. 2018].

Les fibres ajoutées vont travailler comme renforcement dispersé et également augmenter la résistance au jeune âge. De plus, elles peuvent aider à réduire le retrait [DE SCHUTTER et al. 2018]. HAMIDI et al. [HAMIDI et ASLANI 2019] notent que l'ajout de fibres va changer le type de fissuration : avec incorporation de fibres, on retrouve plutôt beaucoup de petites fissures au lieu de quelques fissures plus grandes. La taille des fibres joue également un rôle : les petites fibres ont plutôt le but de contrôler l'ouverture ainsi que la propagation des micro-fissures, alors que les fibres plus grandes sont plutôt utilisées pour empêcher des fissures plus grandes et augmenter la résistance de la pièce en béton [HAMIDI et ASLANI 2019].

On peut donc conclure que, pour cette méthode de renforcement, des recherches supplémentaires sont nécessaires afin d'améliorer le comportement à l'interface entre deux couches. De plus, il faut que l'anisotropie du matériau, à cause de l'orientation des fibres, soit prise en compte lors du dimensionnement, ce qui nécessite une adaptation des normes utilisées pour la conception [ASPRONE et al. 2018].

ŞAHIN et al. [ŞAHIN et MARDANI-AGHABAGLOU 2022] mentionnent une autre technique qui a été testée par l'entreprise de construction chinoise Hua Shang Tengda : une cage d'armatures en acier est mise en place avant de commencer l'impression, et ensuite les couches de béton sont imprimées autour en utilisant un système de double pulvérisation.

Enfin, une autre méthode consiste à réaliser une poutre en béton armé à partir de plusieurs segments qui sont imprimés. Ensuite, ces segments imprimés sont assemblés grâce à un système extérieur de renforcement en acier pour former finalement une poutre continue. Un exemple d'application de cette technique est une passerelle qui a été construite en six segments par l'Université d'Eindhoven. Ces six segments ont été imprimés et connectés en utilisant des tendons précontraints post-tendus (FIGURE 2.14) [ASPRONE et al. 2018].



FIGURE 2.14 – Passerelle avec tendons aux Pays Bas [ASPRONE et al. 2018]

2.2 Sable recyclé

2.2.1 Recyclage des déchets de construction et de démolition

Des quantités très importantes de déchets de construction et de démolition sont produites chaque année et mises en décharge dans le monde entier [ZHAO et al. 2015]. Les déchets inertes comprennent la fraction minérale des déchets de construction et de démolition. Ils sont définis comme les "déchets qui, de par leurs caractéristiques physico-chimiques, ne peuvent à aucun moment ni altérer les fonctions du sol, de l'air ou des eaux ni porter atteinte à l'environnement ou à la santé de l'homme" [FEREDECO et al. 2022]. Les déchets inertes sont divisés en trois catégories :

1. Les déchets de béton, obtenus par la démolition de bâtiments ou d'infrastructures de génie civil,
2. Les déchets mixtes, qui sont un mélange de différents déchets de construction tels que des briques, des blocs en béton ou encore des céramiques,
3. Les déchets hydrocarbonés, qui proviennent de la déconstruction de surfaces asphaltées [FEREDECO et al. 2022].



(a) Déchets de béton (b) Déchets mixtes (c) Déchets hydrocarbonés
[FEREDECO et al. 2022] [FEREDECO et al. 2022] [FEREDECO et al. 2022]

FIGURE 2.15 – Les différents types de déchets inertes [FEREDECO et al. 2022]

En Wallonie, les déchets de construction et de démolition représentent avec environ 40% une partie importante de l'ensemble des déchets produits. Cependant, d'un point de vue économie circulaire, ces déchets inertes tels que le béton ou les briques, ont un grand potentiel d'être valorisés, notamment comme granulats recyclés. À l'heure actuelle, environ 6 millions de tonnes de granulats recyclés sont produites par an en Wallonie. L'objectif

wallon est "d'intégrer un minimum de 30% de granulats recyclés dans la totalité des granulats utilisés annuellement en travaux publics, sous réserve de faisabilité technique" [FEREDECO et al. 2022].

Le recyclage de ces déchets de construction et de démolition est important à deux égards : d'un côté, il permet de réutiliser les déchets produits et de l'autre côté, de diminuer les quantités consommées de matériaux naturels [DING, XIAO, QIN et al. 2020]. De plus, une utilisation plus fréquente des granulats recyclés et du sable recyclé permettrait au secteur de la construction de basculer vers une économie plus circulaire [DE VLIEGER et al. 2023]. "L'économie circulaire est un modèle de production et de consommation qui consiste à partager, réutiliser, réparer, rénover et recycler les produits et les matériaux existants le plus longtemps possible afin qu'ils conservent leur valeur. De cette façon, le cycle de vie des produits est étendu afin de réduire l'utilisation de matières premières et la production de déchets." [PARLEMENT EUROPÉEN 2023]

En Wallonie, il est actuellement obligatoire de recycler les déchets inertes de construction et de démolition. Afin de les recycler, les déchets inertes sont triés, stockés et concassés et criblés dans des centres de recyclage. Ensuite, les granulats recyclés produits sont contrôlés afin de garantir leur conformité aux normes européennes. Selon la catégorie des déchets inertes, différentes applications de réutilisation sont possibles [FEREDECO et al. 2022].



(a) Granulats de béton (b) Granulats mixtes (c) Granulats hydrocarbonés
[FEREDECO et al. 2022] [FEREDECO et al. 2022] [FEREDECO et al. 2022]

FIGURE 2.16 – Les différents types de granulats recyclés [FEREDECO et al. 2022]

Par exemple, les granulats recyclés ainsi que le sable recyclé qui sont produits à partir des déchets de béton peuvent être utilisés dans la fabrication de nouveaux bétons et mortiers [SUN et al. 2020] [ZHAO et al. 2015]. Les granulats recyclés de béton sont des granulats sur lesquels on trouve une partie de l'ancienne pâte de ciment durcie qui y est restée attachée [ZHAO et al. 2015]. C'est pourquoi les propriétés des granulats recyclés sont en général inférieures à celles des granulats naturels. En effet, les granulats recyclés ont une résistance en compression réduite, sont plus poreux et absorbent plus d'eau que les granulats naturels. Par conséquent, cela conduit à des propriétés mécaniques réduites du béton fabriqué à base de granulats recyclés comparé à un béton à base de granulats naturels. Cependant, beaucoup de facteurs influencent les propriétés du béton recyclé produit. En effet, en choisissant une granulométrie adéquate et une méthode de malaxage adaptée et en utilisant des granulats recyclés de bonne qualité, il est possible d'améliorer les propriétés mécaniques du béton recyclé pour que l'effet des granulats recyclés se fasse moins sentir [SUN et al. 2020]. La partie plus fine des granulats recyclés, c'est-à-dire le sable recyclé, est plus difficile à incorporer dans des bétons ou mortiers à cause de son

absorption d'eau importante. Les bétons et mortiers dans lesquels du sable recyclé est incorporé ont en général des propriétés mécaniques réduites et sont moins durables que les bétons et mortiers contenant uniquement du sable naturel [ZHAO et al. 2015]. C'est pourquoi, même s'il y a déjà de nombreuses applications pour les granulats recyclés, l'utilisation de sable recyclé est encore limitée dans beaucoup de pays. Cependant, il est important de trouver une valorisation pour le sable recyclé également, puisqu'il est un sous-produit de la fabrication des granulats recyclés [LI et al. 2021].

À l'heure actuelle, 99% du sable recyclé produit dans la région flamande sont utilisés dans des couches de fondations, des remblais ou autres applications bas de gamme similaires qui conduisent à un downcycling du matériau. L'impression 3D est une application haut de gamme dans laquelle le sable recyclé pourrait être utilisé [DE VLIÉGER et al. 2023]. Cependant, même s'il existe déjà de nombreuses études sur l'utilisation de granulats recyclés dans le béton, le nombre de recherches sur le sable recyclé est encore limité, surtout en ce qui concerne l'utilisation de sable recyclé dans l'impression 3D [DING, XIAO, ZOU et al. 2020] [ZOU, XIAO, DUAN et al. 2021].

2.2.2 Sable recyclé et impression 3D

Pour beaucoup d'applications dans le domaine de la construction, le sable recyclé est souvent considéré comme non adapté. La faible densité ainsi que l'absorption d'eau élevée du sable recyclé peuvent avoir des effets négatifs sur le béton recyclé, comme par exemple des propriétés mécaniques réduites ou un retrait plus important. Cependant, dans le mélange d'un béton pour impression 3D, des additions sont souvent utilisées afin d'acquérir les propriétés rhéologiques nécessaires pour l'impression. Ces additions pourraient réduire l'impact négatif sur les propriétés qui est apporté par le sable recyclé et ainsi rendre son utilisation possible [DING, XIAO, QIN et al. 2020].

XIAO et al. [XIAO et al. 2020] notent que l'utilisation du sable recyclé pourrait d'un côté conduire à des propriétés mécaniques réduites, mais que le sable recyclé pourrait de l'autre côté être une opportunité pour obtenir les propriétés rhéologiques spécifiques nécessaires dans l'impression 3D. De plus, ils indiquent qu'il serait dans ce cas possible d'améliorer les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité du béton recyclé en ajoutant des additions ou des fibres [XIAO et al. 2020].

Un des facteurs empêchant actuellement une large diffusion de la technologie d'impression 3D béton est que les mélanges utilisés, comparés au béton traditionnel, sont coûteux. De plus, ils ont un impact environnemental négatif. Cela est non seulement dû à la teneur en ciment élevée, mais également à la quantité importante d'adjuvants utilisés dans la composition d'un béton imprimable. Ces adjuvants qui coûtent chers et sont souvent polluants sont nécessaires afin d'obtenir les propriétés rhéologiques requises pour l'impression [DE VLIÉGER et al. 2023]. Puisque des recherches ont déjà montré que l'incorporation de sable recyclé dans le mélange peut améliorer la thixotropie du mortier, l'utilisation du sable recyclé pourrait être une possibilité prometteuse pour réduire les quantités d'adjuvants nécessaires. Cela aurait simultanément deux effets bénéfiques : une réduction du coût ainsi que l'obtention d'un mortier imprimable avec un meilleur bilan environnemental [DE VLIÉGER et al. 2023].

Des recherches sur l'utilisation de sable recyclé dans l'impression 3D sont donc nécessaires : une réduction de la pollution de l'environnement par les déchets de construction et de

démolition, une préservation du sable naturel et même une amélioration de propriétés importantes pour l'impression sont attendues [ZOU, XIAO, DING et al. 2021]. Un projet portant sur l'utilisation de sable recyclé dans l'impression 3D est le projet CIRMAP dans le cadre duquel du mobilier urbain est imprimé en utilisant un mortier à base de 100 % de sable recyclé. À ce projet participent 17 partenaires de 5 pays européens dont l'Université de Liège [Yeakleang MUY, HUBERT et COURARD 2023].



FIGURE 2.17 – Projet CIRMAP [AREBS 2023]

2.2.3 Influence du sable recyclé sur les propriétés à l'état frais du mortier

L'utilisation de sable recyclé a des effets sur les propriétés rhéologiques du mortier et, par conséquent, également sur les propriétés essentielles pour l'impression : la pompabilité, l'extrudabilité et la constructibilité [XIAO et al. 2020].

DE VLIEGER et al. [DE VLIEGER et al. 2023] mentionnent différentes études sur l'utilisation de sable recyclé dans les bétons. Les résultats obtenus dans ces études indiquent que le seuil de cisaillement ainsi que la viscosité plastique du mortier augmentent lorsque du sable recyclé est utilisé dans le mélange. Ces observations peuvent être justifiées par la forme plus irrégulière et la texture plus rugueuse des grains du sable recyclé. De plus, il a été observé que le degré de thixotropie du mortier augmente avec la quantité de sable recyclé incorporée [DE VLIEGER et al. 2023]. Les auteurs ont comparé le comportement de quatre mélanges : un mélange de référence avec 100 % de sable naturel et trois mélanges avec respectivement 25 %, 50 % et 100 % de sable recyclé. Pour comparer la fluidité des différents mélanges, des essais d'étalement ont été réalisés grâce à une table à secousses. DE VLIEGER et al. [DE VLIEGER et al. 2023] ont observé que le diamètre d'étalement diminue lorsque la quantité de sable recyclé dans le mélange augmente. L'incorporation de sable recyclé a donc l'effet de diminuer la fluidité du mortier. Cette observation peut être expliquée par le fait que les grains du sable recyclé sont moins ronds que ceux du sable naturel ce qui va augmenter le frottement interne entre les grains et ainsi rendre le mortier moins fluide [DE VLIEGER et al. 2023].

De plus, DE VLIEGER et al. [DE VLIEGER et al. 2023] ont testé différentes propriétés

rhéologiques en utilisant un rhéomètre. Ils ont constaté que le seuil de cisaillement statique ainsi que le seuil de cisaillement dynamique augmentent tous les deux lorsque du sable naturel est remplacé par du sable recyclé. En outre, les auteurs ont remarqué que la différence entre le seuil de cisaillement statique et le seuil de cisaillement dynamique devient plus importante lorsque la quantité de sable recyclé augmente. À nouveau, ces résultats peuvent être expliqués par la forme moins ronde des grains du sable recyclé et l'augmentation des forces de frottement internes qui en résulte. Les grains plus anguleux améliorent la compacité du mortier recyclé et par conséquent, plus de force est nécessaire pour la rompre : le seuil de cisaillement statique augmente. Ensuite, une fois le mortier est mis en mouvement, les grains vont suivre la direction de l'écoulement et la force nécessaire pour maintenir le mouvement tend vers le seuil de cisaillement dynamique. Puisque les grains s'alignent dans la direction de l'écoulement, leur géométrie a moins d'influence sur le seuil de cisaillement dynamique que sur le seuil de cisaillement statique. En relation avec le seuil de cisaillement augmenté, DE VLIEGER et al. mentionnent encore qu'un remplacement de tout le sable naturel par du sable recyclé pourrait causer des problèmes pour l'impression à cause de la pompabilité et l'extrudabilité qui diminuent et pourraient devenir insuffisantes [DE VLIEGER et al. 2023].

Un autre facteur important pour l'imprimabilité est la résistance au jeune âge du mortier. Comme c'était vu au premier chapitre de cette revue de littérature, les exigences sur la résistance au jeune âge sont différentes pour le béton imprimé que pour le béton moulé à cause de l'absence des coffrages. En effet, le béton imprimé doit porter son propre poids ainsi que le poids des couches supérieures dès le début afin de remplir le critère de constructibilité. Cela nécessite une résistance au jeune âge plus élevée pour éviter une rupture prématurée [DING, XIAO, QIN et al. 2020].

DING et al. [DING, XIAO, QIN et al. 2020] ont étudié l'effet que l'incorporation de sable recyclé dans le mélange a sur la résistance au jeune âge du béton imprimé. Pour cela, ils ont préparé trois mélanges : un mortier de référence avec 100 % de sable naturel et deux mortiers où 25 % ou 50 % respectivement du sable naturel sont substitués par du sable recyclé. Les échantillons cylindriques étaient préparés dans des moules, mais la composition du mortier fabriqué est celle d'un mortier imprimable. Pour les mortiers contenant du sable recyclé, plus d'eau a été ajoutée dans le mélange pour prendre en compte l'absorption d'eau du sable recyclé. Des essais en compression sur les échantillons cylindriques des trois mélanges ont alors été réalisés après 30, 45, 60, 90, 120 et 150 minutes afin de mesurer la résistance en compression ainsi que la déformation verticale et latérale. Les conclusions que DING et al. [DING, XIAO, QIN et al. 2020] ont tiré de ces essais sur l'influence du sable recyclé sur les propriétés au jeune âge du béton imprimé sont les suivantes :

- En fonction du temps, les auteurs ont observé deux schémas de rupture différents. Le premier est caractérisé par une déformation latérale importante et peut être trouvé sur les échantillons testés après 30 et 60 minutes. Pour ces temps, aucune différence n'est observée entre les échantillons avec et sans sable recyclé. Le deuxième schéma de rupture consiste en une rupture en cisaillement, avec un plan de cisaillement bien visible et beaucoup moins de déformation latérale que pour le premier schéma. Ce deuxième schéma a été observé sur les échantillons testés à 90, 120 et 150 minutes après l'extrusion. DING et al. [DING, XIAO, QIN et al. 2020] ont remarqué que, plus le pourcentage de sable recyclé dans le mélange est élevé, plus la fissure en cisaillement du deuxième schéma de rupture apparaît

vite. Le sable recyclé a ainsi comme effet que le mortier passe plus rapidement du premier au deuxième schéma de rupture. De cela, il peut être conclu que le sable recyclé joue un rôle accélérateur dans le développement de la résistance au jeune âge [DING, XIAO, QIN et al. 2020].

- En ce qui concerne la déformation latérale, celle-ci diminue pour les trois mélanges testés lorsque le temps progresse. Des différences deviennent visibles lorsqu'on regarde l'évolution du diamètre de la section transversale des échantillons lors de l'essai de compression, représenté sur la FIGURE 2.18. Ce diamètre est le plus grand pour le mélange avec 100% de sable naturel et diminue avec la quantité de sable recyclé utilisée. De plus, on peut voir que la différence entre les diamètres des trois mélanges devient plus grande avec le temps. Les auteurs ont alors conclu que l'ajout du sable recyclé a augmenté la raideur du mortier [DING, XIAO, QIN et al. 2020].

- De plus, DING et al. [DING, XIAO, QIN et al. 2020] se sont intéressés à la résistance en compression au jeune âge. Lors de la période de temps étudiée, l'évolution de celle-ci est linéaire en fonction du temps, comme il peut être aperçu sur la FIGURE 2.19. On peut voir sur cette FIGURE que l'ajout de sable recyclé permet d'améliorer la résistance en compression au jeune âge [DING, XIAO, QIN et al. 2020].

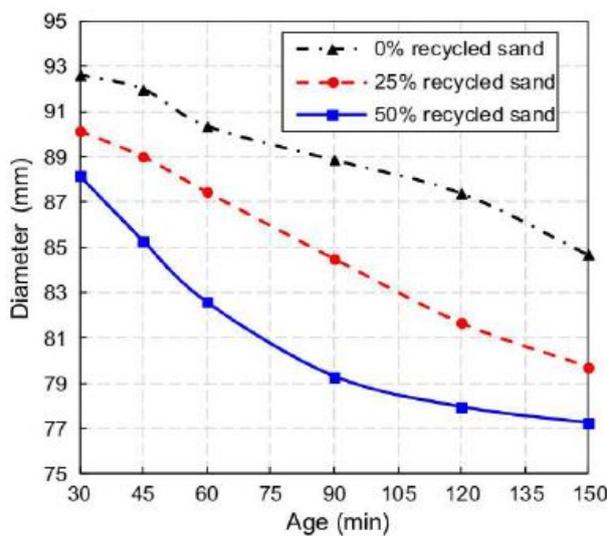


FIGURE 2.18 – Variation du diamètre en fonction du temps lors de l'essai de compression pour les trois séries testées [DING, XIAO, QIN et al. 2020]

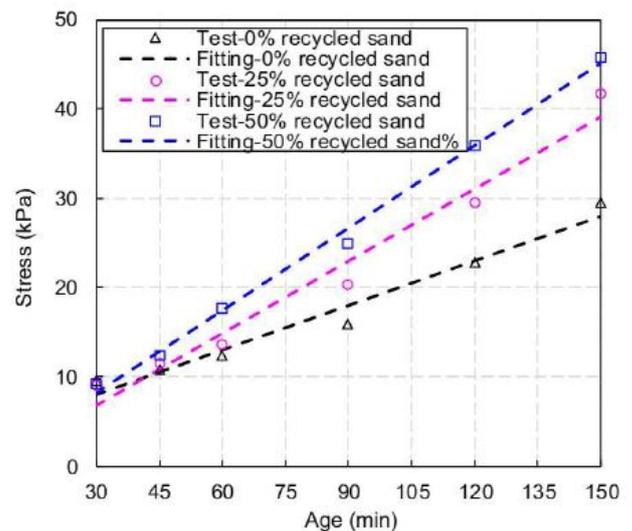


FIGURE 2.19 – Développement de la résistance en compression au jeune âge [DING, XIAO, QIN et al. 2020]

En résumé, DING et al. [DING, XIAO, QIN et al. 2020] ont démontré par leurs essais que plus la quantité de sable recyclé est grande, plus la résistance au jeune âge se développe vite. En relation avec cela, le temps pendant lequel le béton est maniable diminue avec la quantité de sable ajoutée. De plus, les auteurs ont constaté que le sable recyclé n'a pas beaucoup d'effet sur la résistance pendant la première heure alors que son influence devient significative par la suite (entre 60 et 150 minutes). Le sable recyclé ne peut donc pas remplacer les additions nécessaires pour la constructibilité au tout début. Cependant, par la suite, il augmente la résistance au jeune âge du béton et améliore ainsi la constructibilité, ce qui augmente par conséquent également la hauteur qu'on peut atteindre lors d'une session d'impression [DING, XIAO, QIN et al. 2020].

Dans la suite de [DING, XIAO, ZOU et al. 2020] et [DING, XIAO, QIN et al. 2020], ZOU et al. [ZOU, XIAO, DING et al. 2021] ont étudié les propriétés à l'état frais d'un mortier imprimable contenant 100 % de sable recyclé. Les propriétés étudiées étaient la fluidité, l'extrudabilité, la fenêtre d'imprimabilité ainsi que la résistance au jeune âge. Le sable recyclé utilisé a été produit par concassage et criblage de déchets de béton. À nouveau, plus d'eau a été ajoutée dans le mélange afin de prendre en compte l'absorption d'eau du sable recyclé. De plus, différentes quantités de gluconate de sodium ont également été ajoutées dans certains des mélanges suite aux problèmes observés. Ce gluconate de sodium joue le rôle d'un retardeur de prise. Les observations que les auteurs ont pu faire lors de ces essais sont les suivantes :

- Le mortier contenant 100 % de sable recyclé a une fluidité diminuée par rapport au mortier fabriqué avec 100 % de sable naturel. De plus, le sable recyclé a comme effet que le taux auquel le mortier perd sa fluidité au cours du temps augmente. Cependant, en ajoutant du gluconate de sodium, le taux auquel le mortier perd sa fluidité re-diminue jusqu'à atteindre des valeurs proches de celles obtenues pour le mortier à base de sable naturel [ZOU, XIAO, DING et al. 2021].
- Comme le mortier à base de sable recyclé perd plus vite sa fluidité, cela a également des conséquences sur la fenêtre d'imprimabilité qui se raccourcit. Pour que la fenêtre d'imprimabilité reste dans les valeurs prescrites pour l'impression, du gluconate de sodium a été ajouté. Après avoir testé différentes quantités, ZOU et al. conseillent un ajout de gluconate de sodium de 1,2 % par rapport à la masse de ciment [ZOU, XIAO, DING et al. 2021].
- Concernant la résistance au jeune âge, ZOU et al. [ZOU, XIAO, DING et al. 2021] ont fait les mêmes observations que DING et al. [DING, XIAO, QIN et al. 2020] : l'utilisation de sable recyclé augmente considérablement la résistance au jeune âge (entre 60 et 180 minutes) du mortier. Même en ajoutant le retardeur de prise sous forme de gluconate de sodium, la résistance au jeune âge du mortier reste beaucoup plus élevée que celle du mortier contenant 100 % de sable naturel [ZOU, XIAO, DING et al. 2021].

À la suite de leurs recherches précédentes ([XIAO et al. 2020] et [ZOU, XIAO, DING et al. 2021]), ZOU et al. [ZOU, XIAO, DUAN et al. 2021] ont réalisé une étude supplémentaire sur la rhéologie et la constructibilité des mortiers imprimables contenant du sable recyclé. Dans cette étude, cinq mélanges avec différentes quantités de sable recyclé ont été testés et comparés. Dans deux de ces mélanges, du gluconate de sodium a été ajouté :

- Mortier M1 : 100 % de sable naturel
- Mortier M2 : 50 % de sable recyclé
- Mortier M3 : 100 % de sable recyclé
- Mortier M4 : 100 % de sable recyclé et 0,6 g de gluconate de sodium par kg de ciment
- Mortier M5 : 100 % de sable recyclé et 1,2 g de gluconate de sodium par kg de ciment

Tout d'abord, les auteurs se sont intéressés au seuil de cisaillement des différents mortiers testés. La FIGURE 2.20 montre les courbes correspondantes qui ont été obtenues en testant le mortier directement après la fabrication (c'est-à-dire à un temps de repos égal à 0 minutes). De plus, l'influence du temps de repos sur le seuil de cisaillement statique a été évaluée ce qui est représenté sur la FIGURE 2.21 [ZOU, XIAO, DUAN et al. 2021].

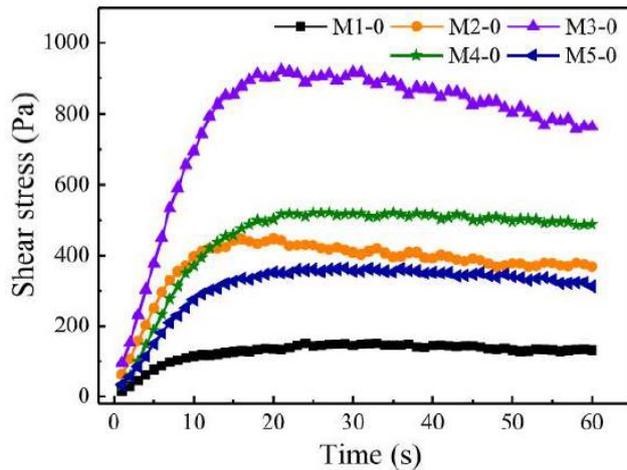


FIGURE 2.20 – Évolution du seuil de cisaillement pour les différents mortiers [ZOU, XIAO, DUAN et al. 2021]

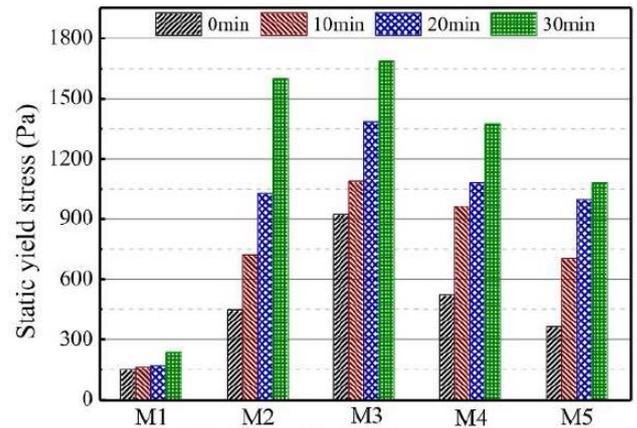


FIGURE 2.21 – Seuil de cisaillement statique en fonction du temps de repos [ZOU, XIAO, DUAN et al. 2021]

Sur la FIGURE 2.20, on peut voir que toutes les courbes présentent d’abord un pic qui correspond au seuil de cisaillement statique et tendent ensuite vers une valeur d’équilibre, le seuil de cisaillement dynamique. En effet, la structure de floculation qui est produite par l’hydratation du ciment peut résister aux forces de cisaillement jusqu’au seuil de cisaillement statique qui marque la rupture de cette structure de floculation. En atteignant le seuil de cisaillement statique, le mortier se met alors en écoulement. En comparant les courbes associées aux différents mortiers testés, il est clairement visible que le remplacement du sable naturel par du sable recyclé fait augmenter significativement le seuil de cisaillement. Cependant, on peut également voir que l’ajout du gluconate de sodium dans les mortiers avec 100 % de sable recyclé permet de rediminuer leur seuil de cisaillement. Ces résultats correspondent bien à ceux de DE VLIEGER et al. [DE VLIEGER et al. 2023], qui ont également conclu que le sable recyclé a comme effet d’augmenter le seuil de cisaillement. La FIGURE 2.21 montre que le temps de repos a également une influence importante sur le seuil de cisaillement statique : celui-ci augmente au fur et à mesure que le temps de repos progresse. Même après 30 minutes, le seuil de cisaillement du mortier contenant 100 % de sable naturel reste beaucoup plus petit que celui des quatre autres mortiers qui contiennent tous du sable recyclé [ZOU, XIAO, DUAN et al. 2021].

Concernant la viscosité, ZOU et al. [ZOU, XIAO, DUAN et al. 2021] ont constaté que celle-ci augmente considérablement lorsque le sable naturel est remplacé par du sable recyclé. De plus, peu importe le type de sable utilisé, la viscosité augmente avec le temps de repos. Cette augmentation de la viscosité avec le contenu de sable recyclé correspond bien à ce que DE VLIEGER et al. [DE VLIEGER et al. 2023] ont également mentionné dans leur article.

Finalement, un dernier point intéressant qui a été étudié par ZOU et al. [ZOU, XIAO, DUAN et al. 2021] est l’influence du sable recyclé sur le mode de rupture lors de l’impression. Pour cela, des cylindres ont été imprimés jusqu’à leur rupture, et les modes de rupture ont été comparés pour les mortiers M1 (100% de sable naturel), M3 (100% de sable recyclé) et M5 (100% de sable recyclé et gluconate de sodium). Les modes de rupture observés sont visibles sur la FIGURE 2.22 suivante [ZOU, XIAO, DUAN et al. 2021].

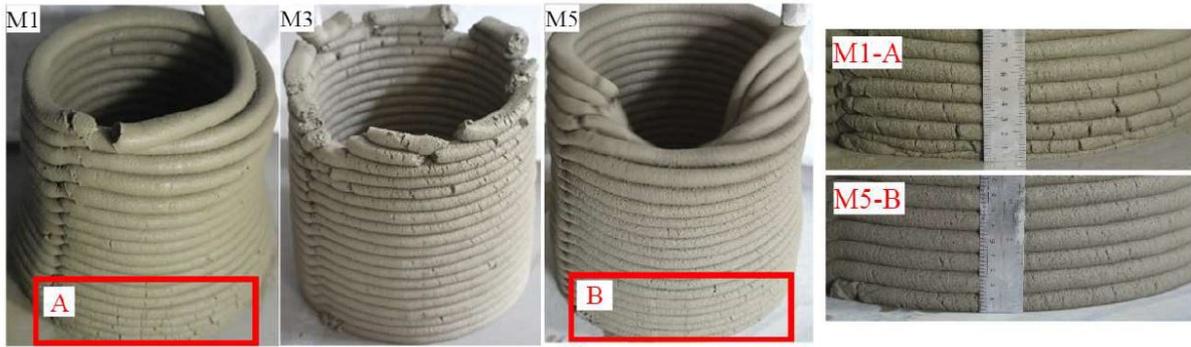


FIGURE 2.22 – Mode de rupture lors de l'impression 3D pour différents mortiers [ZOU, XIAO, DUAN et al. 2021]

La FIGURE 2.22 montre que la rupture des éléments imprimés avec les mortiers M1 et M5 était une rupture par instabilité. Cependant, la déformation que ZOU et al. [ZOU, XIAO, DUAN et al. 2021] ont observé était beaucoup plus importante dans le cas du mortier M1. En analysant les couches les plus basses des cylindres imprimés, on peut remarquer que celles-ci sont beaucoup plus fissurées dans le cas du mortier M1 que dans le cas du mortier M5. Cette fissuration augmente encore plus la déformation des couches inférieures. Concernant le mortier M3, le mode de rupture de l'élément imprimé se distinguait des deux autres. Pour ce mortier, les auteurs n'ont quasi pas constaté de déformation verticale. Par contre, la largeur des couches supérieures diminuait avec le temps, jusqu'à causer des discontinuités dans les couches imprimées. Une rupture par instabilité et accumulation des déformations des couches, comme c'était le cas pour les mortiers M1 et M5, a lieu lorsque la vitesse à laquelle le mortier durcit est trop lente par rapport à la vitesse d'impression. Au contraire, une rupture par discontinuité des couches, comme c'était le cas pour le mortier M3, a lieu lorsque le mortier devient de plus en plus difficile à extruder. Dans ce cas, la vitesse à laquelle le mortier durcit est trop élevée par rapport à la vitesse d'impression. Dans le cas du mortier M5 dans lequel du gluconate de sodium a été ajouté, la vitesse de durcissement du mortier et la vitesse d'impression étaient le plus proche l'une de l'autre. En effet, dans ce cas, la déformation des couches était beaucoup moins importante que pour le mortier M1, et aucune discontinuité de couches n'avait lieu lors de l'impression comme c'était le cas pour le mortier M3. Les auteurs ont donc conclu que l'ajout de gluconate de sodium dans le mortier à base de sable recyclé était une bonne solution pour améliorer son imprimabilité [ZOU, XIAO, DUAN et al. 2021].

Comme conclusion sur l'influence du sable recyclé sur les propriétés à l'état frais du mortier, on peut dire que le sable recyclé fait augmenter le seuil de cisaillement ainsi que la viscosité du mélange. De plus, lorsque du sable recyclé est utilisé, la résistance au jeune âge du mortier se développe plus vite. Tout cela a des effets bénéfiques sur la constructibilité mais une influence négative sur l'extrudabilité ainsi que le temps pendant lequel le mortier peut être imprimé [ZOU, XIAO, DUAN et al. 2021].

2.2.4 Influence du sable recyclé sur les propriétés à l'état durci du mortier

DING et al. [DING, XIAO, ZOU et al. 2020] ont réalisé une étude sur l'effet que l'incorporation de sable recyclé dans un béton pour impression 3D a sur les propriétés mécaniques

à l'état durci. Pour cela, différents mélanges dans lesquels une partie du sable naturel a été substituée par du sable recyclé ont été testés, allant jusqu'à une substitution de 50% en masse. L'absorption d'eau du sable recyclé a été prise en compte en ajoutant de l'eau additionnelle dans le mélange, et la composition du mortier était telle que toutes les conditions nécessaires pour l'impression 3D étaient vérifiées. Afin de prendre en compte l'anisotropie induite par le mode de fabrication par impression, les échantillons étaient imprimés et testés en compression et flexion dans les différentes directions. En plus, des échantillons moulés ont également été testés et ont servi comme référence. Pour distinguer les différentes directions dans lesquelles les charges sont appliquées lors des essais, un système de coordonnées a été introduit. L'axe X était défini comme la direction dans laquelle la buse se déplace ce qui signifie que les couches imprimées sont parallèles à cet axe. Ensuite, l'axe Y a été fixé comme perpendiculaire à l'axe X dans le plan d'impression, et l'axe Z est perpendiculaire au plan d'impression X-Y. Ces différentes directions d'application de charges sont représentées sur la FIGURE 2.23 [DING, XIAO, ZOU et al. 2020].

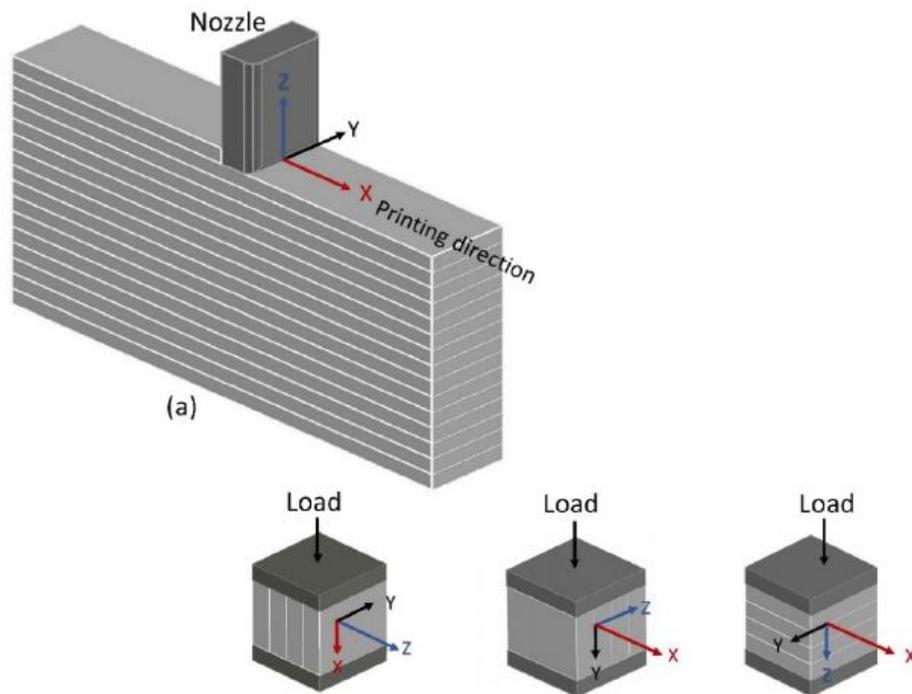


FIGURE 2.23 – Les différentes directions d'application de charges [REHMAN et KIM 2021]

Pour étudier l'influence du sable recyclé sur les propriétés mécaniques du béton imprimé, DING et al. [DING, XIAO, ZOU et al. 2020] ont réalisé des essais en compression, flexion et fendage par traction. Les conclusions que les auteurs ont pu tirer de ces essais sont les suivantes :

- En ce qui concerne la résistance en compression, celle-ci diminue lorsqu'une partie du sable naturel est remplacée par du sable recyclé. Cette observation a été faite pour les échantillons moulés ainsi que pour les échantillons imprimés, peu importe la direction testée. La plus grande résistance en compression a été observée sur les échantillons moulés : elle était de 31 MPa dans le cas de 100 % de sable naturel et diminuait jusqu'à 23,3 MPa lorsque la moitié était du sable recyclé. La plus petite résistance en compression était

celle observée dans la direction Y sur les échantillons imprimés, avec 17,8 MPa pour les échantillons avec 100 % de sable naturel et 13,3 MPa pour ceux avec 50 % de sable recyclé [DING, XIAO, ZOU et al. 2020].

- Pour la résistance au fendage par traction, il n'était pas possible de voir clairement l'influence du sable recyclé. Pour les échantillons moulés, les auteurs ont observé que la résistance diminuait lorsque le pourcentage de sable recyclé augmentait, avec 2,2 MPa dans le cas de 100% de sable naturel et 1,4 MPa dans le cas de 50% de sable recyclé. Cependant, pour les échantillons imprimés, le comportement est différent. En effet, la résistance au fendage par traction augmente avec la quantité de sable recyclé dans le cas de la force appliquée dans la direction Z. Concernant les directions d'application de charge X et Y, la résistance augmente d'abord et diminue ensuite lorsque le taux de remplacement par du sable recyclé augmente [DING, XIAO, ZOU et al. 2020].
- Finalement, le comportement observé en flexion est similaire pour les échantillons moulés ainsi que pour les trois directions testées des échantillons imprimés. Lorsque le pourcentage de sable recyclé augmente, la résistance en flexion commençait par augmenter également, pour atteindre sa valeur maximale à un taux de substitution de 25 % et re-diminuer ensuite [DING, XIAO, ZOU et al. 2020].

DING et al. [DING, XIAO, ZOU et al. 2020] ont résumé les résultats des résistances mécaniques sur les FIGURES 2.24, 2.25 et 2.26 suivantes. Sur ces FIGURES, FX correspond à la résistance des échantillons imprimés lorsque la charge est appliquée selon l'axe défini comme axe X à la FIGURE 2.23. De manière similaire, FY correspond à la résistance des échantillons imprimés lorsque la charge est appliquée selon l'axe Y et FZ correspond à la résistance lorsque la charge est appliquée selon l'axe Z. "Cast" correspond à la résistance des échantillons moulés.

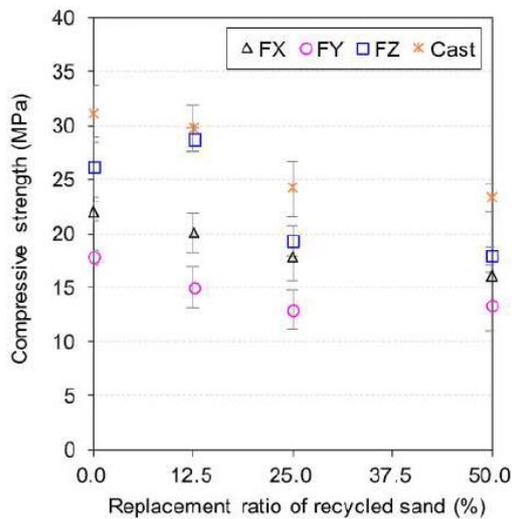


FIGURE 2.24 – Résistance en compression [DING, XIAO, ZOU et al. 2020]

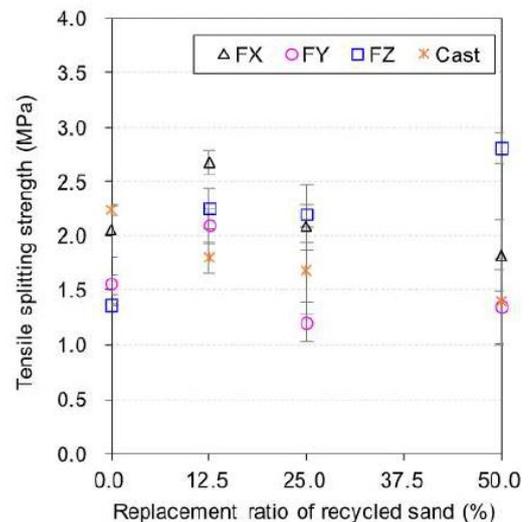


FIGURE 2.25 – Résistance au fendage par traction [DING, XIAO, ZOU et al. 2020]

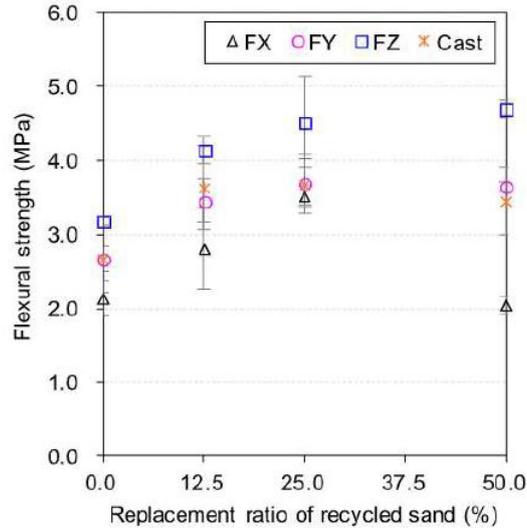


FIGURE 2.26 – Résistance en flexion [DING, XIAO, ZOU et al. 2020]

Les diminutions des résistances peuvent être expliquées par la porosité du mortier contenant du sable recyclé. Beaucoup de pores se retrouvent dans la pâte de ciment contenue dans le sable recyclé ce qui a comme conséquence que la porosité du mortier augmente également lorsque la quantité de sable recyclé utilisée augmente. Ainsi, la résistance mécanique diminue à cause de la diminution de la compacité du mortier. De plus, des microfissures sont observées dans la zone de transition interfaciale entre le sable recyclé et l'ancienne pâte de ciment adhérente. Ces microfissures ont vraisemblablement été causées par le broyage [DING, XIAO, ZOU et al. 2020].

En ajoutant du sable recyclé, la quantité totale de ciment dans le mortier fabriqué augmente à cause du ciment contenu dans le sable recyclé qui est non négligeable. Cela assure que les résistances mécaniques ne diminuent pas trop fortement [DING, XIAO, ZOU et al. 2020]. Les augmentations des résistances au fendage par traction et en flexion lorsqu'une petite quantité de sable recyclé est incorporée pourraient être liées à la forte absorption d'eau et un mécanisme de durcissement interne dans le sable recyclé [DING, XIAO, ZOU et al. 2020].

De plus, DING et al. [DING, XIAO, ZOU et al. 2020] ont étudié l'évolution des résistances mécaniques (résistance en compression, résistance au fendage par traction, résistance en flexion) au cours des 28 premiers jours et ont comparé l'évolution des échantillons avec 100% de sable naturel à celle des échantillons avec 25% de sable recyclé. Entre 7 et 14 jours, l'augmentation des résistances était similaire pour les deux séries testées. Cependant, entre 14 et 28 jours, l'augmentation des résistances était plus marquée pour les échantillons contenant du sable recyclé. L'explication donnée par les auteurs pour cette différence est la suivante : non seulement le nouveau ciment, mais également la pâte de ciment non hydraté attachée au sable recyclé contribuent tous les deux à l'augmentation des propriétés mécaniques au cours du temps [DING, XIAO, ZOU et al. 2020].

ZHAO et al. [ZHAO et al. 2015] ont étudié l'influence que l'état de saturation du sable recyclé a sur les propriétés du mortier. Pour cela, ils ont testé deux séries de mortiers avec deux états de saturation différents du sable recyclé : sable sec et sable saturé. Dans la première série, le sable recyclé a été placé pendant 24 heures dans l'étuve à 105°C

afin de le sécher et dans la deuxième série, le sable a été pré-saturé pendant 24 heures avant la fabrication du mortier. Les auteurs ont constaté par la suite que la résistance en compression des échantillons contenant le sable sec était plus grande que celle des échantillons contenant le sable saturé. Par contre, la résistance en flexion était similaire pour les deux séries testées et ne changeait pas en fonction de l'état de saturation du sable. ZHAO et al. [ZHAO et al. 2015] ont également comparé les résistances mécaniques des mortiers à base de 100% de sable naturel à celles des mortiers à base de 100% de sable recyclé. Les résultats obtenus concordent avec ceux de DING et al. [DING, XIAO, ZOU et al. 2020] : les résistances en compression et en flexion sont plus faibles pour les échantillons avec sable recyclé que pour les échantillons avec sable naturel, quel que soit l'état de saturation du sable. De plus, en testant différents pourcentages de substitution par sable recyclé, les auteurs ont pu constater que la résistance en compression décroît graduellement lorsque le pourcentage de sable recyclé augmente [ZHAO et al. 2015].

Afin d'expliquer l'influence de l'état de saturation du sable sur la résistance en compression, ZHAO et al. [ZHAO et al. 2015] ont analysé la zone de transition interfaciale ITZ dans les deux situations. L'explication proposée par les auteurs est la suivante : dans le cas du sable pré-saturé, une partie de l'eau déjà contenue dans le sable passe vers la nouvelle pâte de ciment ce qui a comme conséquence d'augmenter localement le rapport E/C à la surface des grains de sable. La zone de transition interfaciale formée entre le sable et la nouvelle pâte de ciment est alors plus épaisse. Dans le cas de sable sec, c'est l'effet contraire qui se produit et une partie de l'eau se déplace vers le sable sec. L'eau entraîne des grains de ciment ce qui réduit localement le rapport E/C à la surface des grains de sable et conduit à une zone de transition interfaciale améliorée et moins épaisse [ZHAO et al. 2015].

Finalement, en ce qui concerne le retrait, ZHANG et al. [H. ZHANG et XIAO 2021] ont comparé le retrait plastique de mortiers imprimés à différents taux de substitution du sable naturel par du sable recyclé. Le retrait plastique a lieu dans les premières heures après le malaxage lorsque le béton est encore jeune. Le retrait et les fissures formées à ce stade peuvent induire des problèmes ultérieurement lorsque le béton a durci, notamment concernant la durabilité du béton. La méthode de fabrication par impression 3D ainsi que l'utilisation de sable recyclé dans le mélange vont toutes les deux influencer le retrait plastique et la fissuration du mortier. En effet, elles ont une influence sur l'évaporation de l'eau se trouvant dans les capillaires. De plus, l'impression 3D est caractérisée par l'absence de coffrages, et on retrouve un ratio E/C faible dans les mortiers imprimables. Cela conduit à une évaporation d'eau accélérée et le mortier jeune est moins protégé vis-à-vis de son environnement. C'est pourquoi des recherches sur le retrait des mortiers imprimés contenant du sable recyclé sont nécessaires [H. ZHANG et XIAO 2021].

ZHANG et al. [H. ZHANG et XIAO 2021] ont développé une méthode pour étudier le retrait libre ainsi que le retrait restreint des mortiers imprimés. Afin de détecter l'influence du sable recyclé, ils ont préparé plusieurs mortiers avec des pourcentages différents de sable recyclé. L'absorption d'eau élevée du sable recyclé a été prise en compte en ajoutant de l'eau additionnelle dans les mélanges. Des échantillons de 400 mm de longueur et de 9 couches de hauteur ont alors été imprimés et testés dans un environnement contrôlé avec des conditions de température et d'humidité constantes. Les résultats obtenus pour le retrait plastique libre durant les trois premières heures après impression sont illustrés sur les FIGURES 2.27 et 2.28, la FIGURE 2.27 correspondant au mortier avec 100 % de sable

naturel et la FIGURE 2.28 au mortier avec 100 % de sable recyclé. Les résultats mesurés sur la deuxième couche imprimée (notés NM2# sur les graphiques) sont dessinés en rouge sur ces FIGURES, ceux mesurés sur la cinquième couche (NM5# sur les graphiques) en vert et ceux mesurés sur la huitième couche (NM8# sur les graphiques) en bleu [H. ZHANG et XIAO 2021].

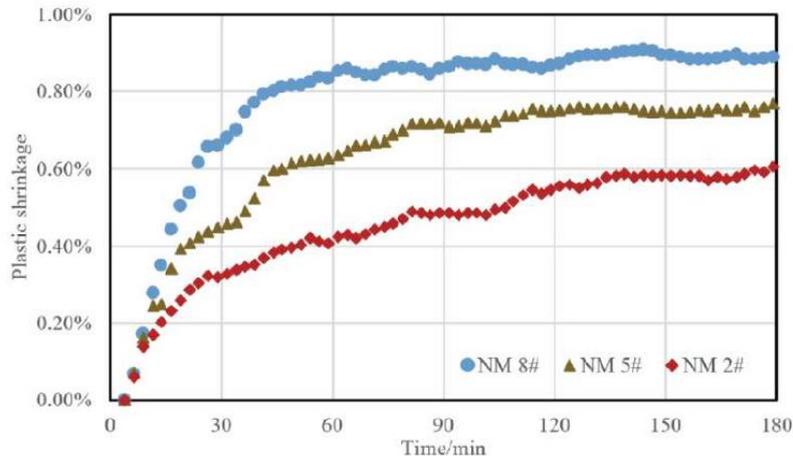


FIGURE 2.27 – Retrait plastique libre dans le cas de 100 % de sable naturel [H. ZHANG et XIAO 2021]

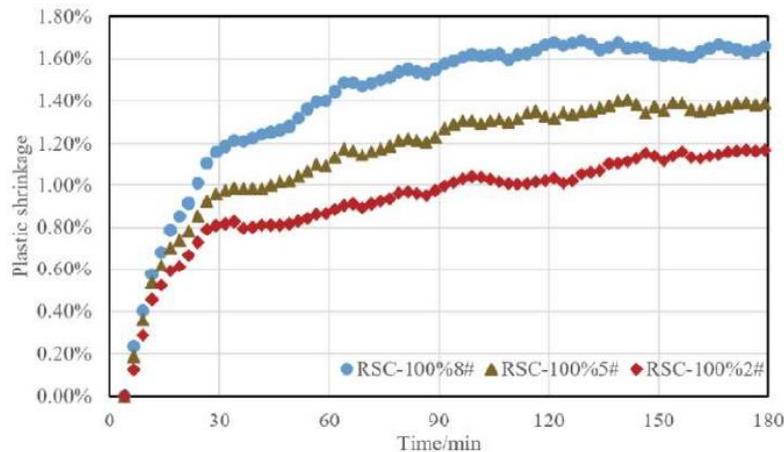


FIGURE 2.28 – Retrait plastique libre dans le cas de 100 % de sable recyclé [H. ZHANG et XIAO 2021]

On peut remarquer sur les FIGURES 2.27 et 2.28 que le retrait plastique des couches du haut est plus élevé que celui des couches en bas, et ceci peu importe si du sable naturel ou du sable recyclé a été utilisé. Les auteurs expliquent cela par le fait que le frottement avec le sol restreint la déformation du mortier imprimé ce qui a un effet sur les couches les plus basses. On peut également voir que lors de l'essai, le retrait plastique se développe principalement pendant la première heure après l'impression. De plus, les essais montrent que le retrait est plus grand dans le cas du mortier à base de sable recyclé que dans le cas du mortier à base de sable naturel. En testant différents taux de remplacement, ZHANG et al. [H. ZHANG et XIAO 2021] ont pu constater que jusqu'à une quantité de 25% de sable recyclé, le retrait reste quasi identique à celui du mortier

avec 100% de sable naturel. Cependant, pour les mortiers contenant une plus grande quantité de sable recyclé, le retrait augmente considérablement comparé au mortier de référence contenant uniquement du sable naturel. Dans le cas de 100% de sable recyclé, le retrait est presque le double du retrait mesuré dans le cas de 100% de sable naturel. Cette augmentation du retrait est causée par la surface des grains du sable recyclé sur laquelle on retrouve encore des petites quantités d'ancienne pâte de ciment non-hydratée ainsi que par la porosité et l'absorption d'eau élevée du sable recyclé [H. ZHANG et XIAO 2021]. Lorsque les déformations dues au retrait étaient restreintes, des fissures se sont formées. ZHANG et al. [H. ZHANG et XIAO 2021] ont observé que plus la quantité de sable recyclé dans le mortier devient importante, plus la vitesse de développement des fissures augmente. De plus, si le pourcentage de remplacement par sable recyclé est plus important que 25%, la largeur et la profondeur des fissures augmentent avec le contenu de sable recyclé. Finalement, les auteurs soulignent encore que ces résultats ont été obtenus dans un environnement contrôlé au laboratoire, et que les effets d'autres conditions de température et d'humidité sur le retrait doivent encore être étudiés [H. ZHANG et XIAO 2021].

2.3 Durabilité

2.3.1 Définition et indicateurs de durabilité

Une définition de la durabilité est proposée par GUIRAUD : "La durabilité de l'ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans ses conditions d'environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible (sous réserve de la mise en œuvre d'une maintenance préventive programmée)." [GUIRAUD 2018]

Lorsque la durabilité d'une structure en béton est mauvaise, cela est très souvent dû à une des trois causes suivantes : un enrobage insuffisant des armatures, un béton de mauvaise qualité ou un environnement qui n'a pas été pris en compte correctement lors de la formulation du béton [COURARD 2021]. Les normes prennent en compte l'environnement auquel la structure en béton sera soumise via des prescriptions de composition. Il est important de considérer la durabilité et le comportement à long terme lors de la phase de conception afin d'éviter des réparations compliquées et coûteuses dans la suite [BAROGHEL-BOUNY 2005]. L'environnement doit être pris en compte lors de la formulation de la composition du béton. Pour cela, les classes d'environnement ont été introduites. Ces classes d'environnement prennent en compte le risque de corrosion des armatures et de l'attaque chimique du béton et donnent des prescriptions sur le rapport E/C maximal, la teneur en ciment minimale et la résistance caractéristique minimale en compression [COURARD 2021].

Les deux causes de dégradation principales des ouvrages en béton armé sont la corrosion des armatures ainsi que l'alcali-réaction. La corrosion des armatures est une réaction oxydo-réduction qui peut être induite par l'attaque par des ions chlorures ou la carbonatation du béton [BAROGHEL-BOUNY 2005]. La réaction de corrosion fonctionne par la formation d'une pile avec circulation des électrons dans les armatures et migration d'ions au voisinage des armatures. La corrosion peut seulement avoir lieu en présence d'une différence de potentiel et de l'eau [COURARD 2021]. L'oxydation du métal a comme conséquence que la section des armatures diminue. De plus, puisque le volume des oxydes formés est supérieur

au volume initial de l'armature, un gonflement a lieu et induit des contraintes de traction dans le béton [BAROGHEL-BOUNY 2005]. Afin d'éviter la corrosion, un béton de bonne qualité, un pH élevé ou un agent pour protéger les armatures sont des solutions. Parmi les facteurs qui favorisent la corrosion, on peut citer l'oxygène, l'eau, les courants électriques, les chlorures et les environnements qui diminuent le pH. Concernant la corrosion induite par l'attaque par des ions chlorures, le niveau de pénétration des chlorures est influencé par différents facteurs tels que la quantité de chlorures, la perméabilité du béton et la teneur en eau. L'origine des chlorures peut par exemple être l'eau de mer ou les sels de déverglaçage [COURARD 2021]. Les alcali-réactions sont des réactions de gonflement internes du béton causées par les attaques de sulfates qui peuvent induire des contraintes internes importantes dans la structure en béton. Par conséquent, des fissures peuvent se former ce qui rend la pénétration d'agents agressifs plus facile [BAROGHEL-BOUNY 2005].

Les indicateurs de durabilité peuvent être définis comme des "paramètres relatifs au matériau constitutif béton qui apparaissent comme fondamentaux pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité du matériau et de la structure vis-à-vis d'un ou plusieurs processus de dégradation" [BAROGHEL-BOUNY 2005]. De plus, les indicateurs de durabilité sont choisis tels qu'ils peuvent être testés au laboratoire avec une reproductibilité, précision et simplicité adéquates. Les cinq indicateurs de durabilité généraux sont les suivants :

- La porosité accessible à l'eau ;
- Le coefficient de diffusion des ions chlorures ;
- La perméabilité aux gaz ;
- La perméabilité à l'eau liquide ;
- La teneur en portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [BAROGHEL-BOUNY 2005].

La porosité accessible à l'eau a une influence significative sur la durabilité et est également un indicateur de la qualité du matériau : plus la porosité du béton est faible, meilleures sont ses propriétés. Par exemple, la résistance à la compression du béton augmente lorsque sa porosité diminue puisqu'il y a dans ce cas plus de matière solide qui peut reprendre l'effort [BAROGHEL-BOUNY 2005]. De plus, un béton moins poreux va moins interagir avec son environnement ce qui est favorable pour sa durabilité. La porosité dans le béton est influencée par différents facteurs comme le rapport eau-ciment, les conditions d'hydratation, le type de granulats utilisés et la qualité de la peau. Concernant le rapport E/C, plus celui-ci est grand, plus la porosité est importante et plus les pores sont connectés entre eux. De plus, la taille des pores augmente également lorsque le rapport E/C augmente. Pour les conditions d'hydratation, il est important d'avoir une durée de cure suffisante. De plus, si la cure se fait dans un environnement avec une humidité relative élevée, l'évaporation d'eau et par conséquent la création de capillaires sont réduites. Concernant les granulats, en général, plus leur taille est grande, plus la perméabilité est importante [COURARD 2021].

Les propriétés de transport sont également d'une grande importance pour la durabilité puisque tout mécanisme de dégradation est lié à un processus de transport, que ce soit en phase liquide ou gazeuse [BAROGHEL-BOUNY 2005]. Les propriétés de transport sont fortement liées au réseau capillaire et à la porosité. De manière générale, plus un matériau est poreux, plus il est perméable. La taille ainsi que la connectivité des pores jouent également un rôle important : plus les pores sont connectés, plus la perméabilité est élevée. De plus, la perméabilité augmente lorsque la taille des capillaires augmente puisque les

pertes de charges sont moindres dans un gros capillaire que dans plusieurs fines capillaires. Finalement, la tortuosité des capillaires influence également les propriétés de transport. Si les capillaires sont plus tortueux, le chemin de pénétration est plus long ce qui conduit à des pertes de charges plus importantes. Une tortuosité plus faible est donc liée à une perméabilité plus importante. Par conséquent, différentes possibilités existent pour diminuer la perméabilité du béton : diminuer la porosité totale, la taille des pores ou leur connectivité, ou augmenter la tortuosité des capillaires [COURARD 2021].

2.3.2 Carbonatation

La carbonatation consiste en une réaction chimique du CO_2 contenu dans l'air avec l'hydroxyde de calcium (portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$) du béton. Cette réaction modifie progressivement la structure interne du béton en changeant sa composition chimique. Le CO_2 se diffuse dans la structure poreuse du béton où de l'eau doit être présente pour que la réaction de carbonatation puisse avoir lieu. Dans ce cas, le CO_2 se dilue dans l'eau ce qui permet à la portlandite de se diluer également et de réagir avec le CO_2 . Le produit qui se forme lors de cette réaction est le carbonate de calcium CaCO_3 [POLLET, DOOMS (CSTC) et MOSSELMANS (CRIC) 2007] [GUIRAUD 2019] [COURARD 2021] :



La carbonatation n'est pas forcément un problème. Pour les bétons non armés, elle peut même avoir des effets bénéfiques. La transformation de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en carbonate de calcium CaCO_3 améliore la compacité de la structure du béton. Par conséquent, la résistance en compression du béton carbonaté augmente même légèrement [POLLET, DOOMS (CSTC) et MOSSELMANS (CRIC) 2007].

Par contre, si le béton est armé, la carbonatation peut avoir une influence négative sur sa durabilité en causant des dégradations dues à la corrosion des armatures. Un béton jeune et non carbonaté est très alcalin avec un pH autour de 12 à 13. Si des armatures en acier sont présentes dans le béton, cette alcalinité conduit à une passivation de l'acier ce qui protège les armatures contre la corrosion. La passivation de l'acier consiste en la formation d'une couche d'hydroxydes de fer autour des armatures, qui est quasiment impénétrable. La réaction de carbonatation fait baisser le pH à une valeur proche de 9. C'est pourquoi lors des essais au labo, une solution de phénolphthaléine, qui est un indicateur de pH, est utilisée afin de détecter le front de carbonatation [POLLET, DOOMS (CSTC) et MOSSELMANS (CRIC) 2007]. La carbonatation progresse de la surface en contact avec l'air vers l'intérieur du béton. Le front de carbonatation est la borne entre la zone carbonatée du béton et la zone pas encore affectée par la carbonatation [GUIRAUD 2019] [POLLET, DOOMS (CSTC) et MOSSELMANS (CRIC) 2007]. Lorsque le front de carbonatation atteint les armatures, le pH dans le voisinage des armatures diminue. L'alcalinité est réduite ce qui a comme conséquence que la couche de passivation se déstabilise et ne protège plus l'acier. À partir de ce moment, la corrosion des armatures induite par la carbonatation peut avoir lieu [POLLET, DOOMS (CSTC) et MOSSELMANS (CRIC) 2007] [COURARD 2021].

Concernant la cinétique du processus, la vitesse de carbonatation diminue lorsque la carbonatation progresse à cause de deux raisons : le CO_2 doit pénétrer plus loin dans le béton pour que le front de carbonatation progresse, et la réaction de carbonatation a comme effet de rendre la structure du béton plus compacte et de boucher les pores [POLLET,

DOOMS (CSTC) et MOSSELMANS (CRIC) 2007]. La transformation de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en carbonate de calcium CaCO_3 entraîne une augmentation de volume et la déposition de carbonate de calcium dans les pores et capillaires. Les capillaires deviennent par conséquent plus fins ce qui réduit la perméabilité du béton [COURARD 2021]. La profondeur de carbonatation peut être approximée grâce à la formule suivante, avec D représentant la profondeur de carbonatation en mm, k_c le coefficient de carbonatation et t l'âge du béton en années [POLLET, DOOMS (CSTC) et MOSSELMANS (CRIC) 2007] :

$$D = k_c \cdot \sqrt{t} \quad (2.3)$$

Le coefficient de carbonatation k_c dépend de nombreux paramètres et indique la résistance du béton à la carbonatation. Un coefficient de carbonatation plus élevé signifie que la carbonatation progresse plus rapidement et que le béton est par conséquent moins résistant à la carbonatation [POLLET, DOOMS (CSTC) et MOSSELMANS (CRIC) 2007]. Parmi les facteurs qui influencent la cinétique du processus de carbonatation, on peut citer l'exposition de la structure et la teneur en CO_2 , l'humidité relative et la qualité du béton. Les caractéristiques du béton importantes à prendre en compte sont le type de ciment, la quantité de ciment, le rapport E/C, la teneur en hydrates carbonatables, la porosité totale, la taille et distribution des pores et la perméabilité [GUIRAUD 2019].

- Le type de ciment qui résiste le mieux à la carbonatation est le ciment Portland CEM I. Ce type de ciment donne lieu à une teneur plus élevée de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans la pâte de ciment. Par conséquent, pour consommer le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ présent et le transformer en CaCO_3 , plus de CO_2 est nécessaire [POLLET, DOOMS (CSTC) et MOSSELMANS (CRIC) 2007].
- L'humidité relative de l'environnement est importante puisque la réaction d'hydratation ne peut que se produire en présence d'eau. Cependant, un béton sec se carbonate beaucoup plus vite qu'un béton humide [POLLET, DOOMS (CSTC) et MOSSELMANS (CRIC) 2007]. La vitesse de carbonatation tend vers zéro en atmosphère sèche ou pour des bétons saturés en eau, puisque ces conditions rendent la diffusion du CO_2 dans le béton quasi impossible. L'humidité relative la plus défavorable pour laquelle la vitesse de carbonatation est maximale, est une humidité relative entre 50% et 70% [GUIRAUD 2019].
- Dans les normes, il existe quatre classes d'exposition XC1 à XC4 pour la corrosion induite par la carbonatation. Cela permet d'imposer un dosage minimum en ciment ainsi qu'un rapport E/C maximum en fonction de l'environnement. De plus, il y a également des valeurs minimales d'enrobage lorsque des armatures sont présentes. Ces valeurs sont déterminés en fonction de la classe structurale, des classes d'environnement et des classes d'exposition [POLLET, DOOMS (CSTC) et MOSSELMANS (CRIC) 2007].

2.3.3 Comportement du béton soumis à des cycles de gel et dégel

La résistance aux cycles de gel-dégel est un des problèmes de durabilité les plus rencontrés pour les structures de béton dans les régions froides [WANG et al. 2022]. En ce qui concerne les dégradations liées au gel, la prévention se base sur quatre classes d'exposition XF1 à XF4. En fonction de la classe d'exposition dans laquelle l'ouvrage en béton se trouve, différentes recommandations sur les constituants et la composition existent. Afin de quantifier l'exposition, différents paramètres tels que la saturation en eau, le niveau de

salage et la possible protection au gel sont pris en compte en plus du risque de gel. Par exemple, la saturation en eau à considérer est plus importante pour des surfaces horizontales que pour des surfaces verticales et le salage joue surtout un rôle pour les chaussées routières [BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS 2021]. La dégradation du béton à cause des cycles de gel-dégel est influencée par de nombreux paramètres. L'environnement auquel la structure en béton est soumise ainsi que les caractéristiques du béton en soi jouent un rôle important face aux cycles de gel-dégel. Parmi les facteurs environnementaux, on peut citer la température minimale qui est atteinte ainsi que la durée pendant laquelle cette température minimale est maintenue. En général, plus la température minimale atteinte lors des cycles de gel-dégel est basse, plus la dégradation du béton sera importante. De plus, la vitesse de refroidissement et la saturation en eau du béton sont également des facteurs environnementaux à prendre en compte. En effet, une vitesse de refroidissement lente cause en général plus d'écaillage qu'une vitesse de refroidissement plus élevée [WANG et al. 2022].

Parmi les caractéristiques du béton, le rapport E/C, le type de granulats utilisés, l'utilisation éventuelle d'additions minérales et la porosité ont une influence sur sa résistance aux cycles de gel-dégel. Par exemple, un rapport E/C élevé conduit à une densité plus faible et rend le béton plus sensible à une dégradation à cause des cycles de gel-dégel. Concernant les granulats, leur granulométrie est importante car une granulométrie inappropriée mène à une augmentation de la taille des pores à l'intérieur du béton. La teneur en air a également une influence considérable puisqu'elle affecte la distribution des pores dans le béton [WANG et al. 2022]. De plus, afin d'améliorer la résistance au gel-dégel du béton, il est conseillé d'utiliser des granulats avec une faible capacité d'absorption d'eau. Finalement, les conditions de fabrication ont également une influence sur la quantité d'air entraîné et par conséquent sur la résistance au gel-dégel du béton [BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS 2021].

Pour les bétons soumis à des environnements hivernaux avec une exposition au gel importante, des recommandations sur les caractéristiques du béton et ses constituants sont proposées par BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS dans un guide technique. Ces recommandations concernent les constituants via le type de granulats et de ciment utilisé et des additions minérales ou entraîneurs d'air qui peuvent être inclus. De plus, des caractéristiques tels que le rapport eau-liant maximal, la quantité d'air occlus minimale, les quantités d'additions et la structure du réseau poreux ont également une influence [BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS 2021].

Le processus de dégradation du béton à cause des cycles de gel-dégel peut être divisé en trois phases successives : l'absorption d'eau, la congélation de l'eau et la formation de fissures. La détérioration à cause du gel-dégel concerne surtout le béton qui peut entrer en contact avec l'eau. Dans un premier temps, de l'eau entre dans le béton par les fissures et capillaires et remplit ses pores. Lorsque la température ambiante diminue dans la suite, l'eau dans les pores commence à geler. Il faut noter que l'eau gèle d'abord dans les plus grands pores et que plus les pores sont petits, plus la température doit être basse pour que l'eau contenue dedans commence à geler. On distingue entre trois types de pores. Les pores de gel (1-10 nm) sont les pores les plus petits, et il est quasi impossible que l'eau se trouvant à l'intérieur de ces pores commence à geler. Les bulles d'air sont les pores les plus grands ($> 500 \mu\text{m}$), mais elles sont rarement saturées d'eau dans des conditions de pression normales. Les pores les plus critiques en termes de gel-dégel sont les pores de

taille intermédiaire, appelés pores capillaires (10 nm - 500 μm) [WANG et al. 2022].

Le volume de la glace étant supérieur à celui de l'eau (expansion volumique supérieure à 9% lorsque l'eau se transforme en glace [BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS 2021]), les bords des pores saturés en eau sont soumis à des contraintes en traction lorsque l'eau à l'intérieur commence à geler et à se dilater. De plus, l'eau libre pas encore gelée est mise en pression par la glace qui vient de se former. Lorsque les contraintes en traction à cause de la pression hydraulique dépassent la résistance en traction du béton, des micro-fissures se forment et le béton se dégrade. La dégradation du béton augmente sa porosité ce qui a comme conséquence que sa résistance mécanique diminue et que le béton devient encore plus sensible aux cycles de gel-dégel [WANG et al. 2022][BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS 2021]. De plus, la micro-fissuration qui devient plus importante avec chaque cycle de gel-dégel peut mener à d'autres problèmes de durabilité (pénétration des agents agressifs, risque de corrosion des armatures plus élevé) [BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS 2021].

Pour les dégradations du béton causées par le gel, il peut être distingué entre deux types : le gel interne qui concerne la pâte de ciment à l'intérieur du béton, et l'écaillage qui concerne la surface exposée du béton. Les dégradations de type gel interne ne peuvent pas être réparées. Il est donc important d'utiliser une formulation adéquate pour les bétons placés dans des environnements avec une exposition au gel. L'écaillage est en général plutôt un problème esthétique que structurel. Néanmoins, il conduit à une perte de section du béton et peut favoriser d'autres problèmes de durabilité puisque l'enrobage des armatures est réduit et la pénétration d'agents agressifs est facilitée [BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS 2021].

Si on utilise des granulats recyclés, on doit tout particulièrement faire attention à la résistance au gel : les granulats recyclés contiennent en général beaucoup de pores et donc de l'eau. Si cette eau gèle, cela n'affecte non seulement la pâte mais aussi directement le granulats. Dans ce cas, un éclatement du granulats peut se produire et le béton autour peut même s'en aller. [COURARD 2021].

Afin d'améliorer la résistance du béton aux cycles de gel-dégel, trois stratégies différentes peuvent être envisagées :

1. Améliorer le système des pores en utilisant par exemple des entraîneurs d'air ou des additions minérales,
2. Réduire l'absorption d'eau du béton ce qui peut également être atteint en utilisant des matériaux cimentaires complémentaires,
3. Contrôler la fissuration, par exemple en utilisant des fibres [WANG et al. 2022].

Lorsque la porosité du béton est suffisamment faible, la quantité d'eau qui peut geler est limitée ce qui est évidemment favorable à la résistance du béton soumis aux cycles de gel-dégel. Une porosité suffisamment faible a en effet des avantages multiples : elle a non seulement des effets positifs sur le comportement au gel, mais également sur la résistance en compression et sur le risque de corrosion si des armatures sont présentes [BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS 2021].

Les entraîneurs d'air peuvent améliorer la structure des pores en introduisant de petites bulles d'air (20-50 μm) qui vont agir comme de petits vases d'expansion lorsque l'eau gèle et ainsi réduire les forces internes de traction dans le béton [WANG et al. 2022]. En effet, les entraîneurs d'air vont créer un réseau de fines bulles d'air dans la pâte de ciment. Ces fines

bulles uniformément réparties vont améliorer la résistance au gel du béton grâce à une meilleure répartition des pressions hydrauliques [BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS 2021]. La taille des bulles d'air introduites ainsi que leur distribution jouent un rôle important pour la durabilité du béton soumis à des cycles de gel-dégel. Lorsqu'un entraîneur d'air est ajouté en quantité appropriée dans le mélange, il peut effectivement améliorer la résistance du béton aux cycles de gel-dégel. Pour cela, des quantités entre 0,025 % et 0,1 % d'entraîneur d'air sont jugées efficaces. Cependant, les bulles d'air introduites ont une influence négative sur la résistance mécanique du béton, et d'autres problèmes sont également liés à l'utilisation des entraîneurs d'air vu que ceux-ci ne sont pas compatibles avec des cendres volantes ou des superplastifiants et peuvent devenir instables à basse pression [WANG et al. 2022].

Une addition minérale qui peut être utilisée pour améliorer la durabilité du béton soumis aux cycles de gel-dégel sont les cendres volantes. Dans les bétons contenant des cendres volantes, moins de pores et micro-fissures peuvent être trouvés. De plus, la réaction pouzzolanique et l'effet de remplissage des cendres volantes contribuent à une structure interne plus dense. Des quantités de remplacement de ciment entre 5% et 20% de cendres volantes dans le béton ont un effet positif sur sa durabilité au gel-dégel. Cependant, un dosage trop élevé en cendres volantes (par exemple 50%) a des effets négatifs sur la durabilité en augmentant la quantité de pores et en changeant leur distribution. La fumée de silice est une autre addition minérale qui peut avoir des effets positifs sur le comportement du béton face aux cycles de gel-dégel. Elle a comme effet d'affiner les pores ce qui a comme conséquence que des températures plus basses sont nécessaires pour que l'eau contenue à l'intérieur des pores commence à geler. La quantité conseillée de fumée de silice à ajouter est de 5% à 15%. Le métakaolin peut également affiner les pores et réduire la porosité et l'absorption d'eau du béton s'il est ajouté en quantité appropriée. Des quantités entre 5% et 20% ont des effets bénéfiques alors que des quantités au-dessus de 20% augmentent l'absorption d'eau et ont des effets négatifs sur la durabilité. Des recherches doivent encore être menées afin d'étudier les effets de combinaisons de différentes additions [WANG et al. 2022].

Les entraîneurs d'air ainsi que les additions minérales jouent tous les deux sur la porosité et le réseau de bulles d'air qui peuvent remplir la fonction de réservoirs d'expansion pour l'eau libre non encore gelée mise en pression par l'eau déjà gelée. Puisque l'efficacité de ce réseau dépend fortement de la répartition des bulles d'air, un paramètre appelé facteur d'espacement est souvent utilisé pour la caractériser. Ce facteur d'espacement représente "la demie-distance moyenne entre deux bulles d'air dans la pâte cimentaire" [BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS 2021]. La FIGURE 2.29 montre les résultats d'une étude sur la durabilité des bétons en fonction du rapport E/C et du facteur d'espacement.

A partir de cette FIGURE 2.29, différents comportements possibles peuvent être identifiés en fonction du rapport eau efficace - liant :

- Lorsque ce rapport E/C est inférieur à 0,32 aucune précaution particulière n'est nécessaire. Le béton est très compact, ce qui conduit à une bonne résistance mécanique, une faible quantité d'eau dans les capillaires et une bonne résistance aux cycles de gel-dégel [BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS 2021].
- Lorsque le rapport E/C est entre 0,32 et 0,5 il est conseillé de prendre des précautions pour les bétons qui seront soumis à un environnement extérieur avec des cycles de gel-dégel. Ces précautions peuvent par exemple être des additions minérales ou un

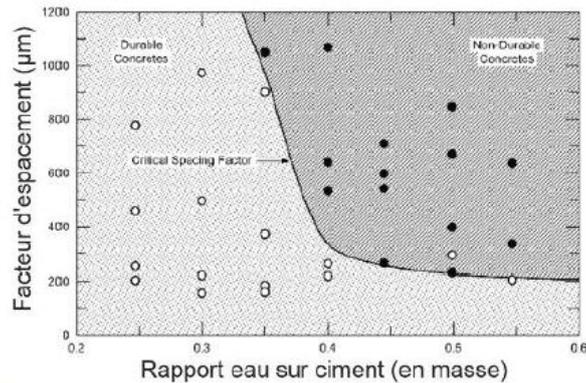


FIGURE 2.29 – "Durabilité des bétons en fonction du rapport E/C et du facteur d'espacement après 300 cycles de gel-dégel d'après les travaux de Okada et al. (1981) présenté par Korhonen (2002)" [BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS 2021]

entraîneur d'air qui vont améliorer le réseau de bulles d'air pour qu'il puisse remplir son rôle protecteur. En effet, pour cela un facteur d'espacement suffisamment petit est nécessaire [BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS 2021].

- Dans le cas d'un rapport E/C supérieur à 0,5 le béton est fortement poreux et une quantité importante d'eau gelable est présente ce qui rend très difficile une bonne résistance au gel, même en utilisant des adjuvants [BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS 2021].

Finalement, une possibilité d'améliorer la résistance du béton aux cycles de gel-dégel en contrôlant la fissuration est l'ajout de fibres. Ces fibres peuvent être faites de nombreux matériaux différents, comme par exemple l'acier ou le polypropylène. Des fibres en acier peuvent en plus avoir des effets positifs sur la porosité en diminuant la taille des pores et en conduisant à des pores de taille plus uniforme. La quantité optimale à ajouter dépend du type de fibres [WANG et al. 2022].

2.3.4 Comportement du béton soumis aux sels de déverglaçage

Le comportement du béton soumis aux cycles de gel-dégel peut être influencé négativement lorsque des sels de déverglaçage sont présents sur sa surface [BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS 2021]. Les sels de déverglaçage qu'on utilise par exemple sur les routes fonctionnent par une réaction chimique endothermique. Cela signifie qu'ils extraient la chaleur nécessaire pour faire fondre la glace et la neige de la couche superficielle du béton. Par conséquent, une chute brutale de température et donc un choc thermique ont lieu à la surface du béton. Des contraintes internes se produisent ce qui peut induire une fissuration de la zone superficielle du béton [COURARD 2021]. Ces sels de déverglaçage peuvent donc mener à l'écaillage, c'est-à-dire à une dégradation de la surface du béton. L'ampleur de cette dégradation dépend entre autres de la concentration en sels de la solution saline présente sur la surface en béton. En effet, des études ont montré que c'est une solution avec une concentration massique en sels de 3% qui cause le plus de dommage [VALENZA et SCHERER 2007]. Il est important de noter que les sels de déverglaçage concernent les dégradations de type écaillage, mais n'ont pas d'influence sur les dégradations de type gel interne [VALENZA et SCHERER 2007].

L'ampleur des dégradations par écaillage ne dépend non uniquement de la quantité de sels présents dans la solution saline, mais également de la température atteinte lors des cycles de gel-dégel. Pour que l'écaillage se produise, il faut que la température minimale atteinte descende au moins jusqu'à -10°C . Plus la température descend, plus les dégradations par écaillage seront importantes. De plus, une durée plus longue pendant laquelle la température minimale est maintenue conduit à des dégradations plus importantes [VALENZA et SCHERER 2007].

Une possibilité pour améliorer la résistance aux sels de déverglaçage et de diminuer les dégradations à cause de l'écaillage est l'utilisation d'entraîneurs d'air. Le facteur d'espacement joue un rôle important non seulement pour le gel interne mais également pour l'écaillage. Si le facteur d'espacement est inférieur à $250\text{-}300\ \mu\text{m}$, la résistance à l'écaillage est en général toujours assurée. Au-dessus de cette valeur, la quantité de particules écaillées augmente lorsque le facteur d'espacement augmente. De plus, l'air entraîné réduit le ressuage. Le ressuage influence l'ampleur des dégradations à cause de l'écaillage puisqu'il a comme effet que la couche la moins dense et qui a la plus faible résistance se trouve en haut, là où l'écaillage a lieu. Cette couche est appelée couche de laitance. L'entraînement d'air peut améliorer la résistance à l'écaillage en empêchant le ressuage et ainsi la formation d'une couche de laitance. Le rapport eau-ciment influence également l'écaillage, puisqu'un rapport E/C plus faible est en lien avec une meilleure résistance et moins de ressuage. Un béton avec un rapport E/C suffisamment faible ($\leq 0,3$) est très résistant à l'écaillage et ne nécessite pas d'entraînement d'air, même en présence d'une solution saline [VALENZA et SCHERER 2007].

2.3.5 Durabilité et impression 3D

Les différents paramètres d'impression tels que la vitesse d'impression et le temps qui passe entre l'impression de deux couches successives ont une influence significative sur la durabilité de la pièce en béton finale. En effet, la vitesse d'impression influence par exemple la porosité créée et par conséquent les propriétés à l'état durci ainsi que la durabilité. Un temps de construction plus long peut conduire à une porosité plus élevée et plus connectée, surtout au niveau des interfaces entre les couches. Dans ce cas, des agents agressifs peuvent entrer plus facilement et les interfaces deviennent un point plus critique pour la durabilité. De plus, des additions minérales sont souvent utilisées dans les bétons pour impression 3D afin d'obtenir les propriétés rhéologiques requises. Le type d'additions utilisées ainsi que leur quantité influencent également la durabilité de la pièce en béton. L'utilisation d'additions minérales peut avoir des effets positifs sur différents aspects de durabilité comme la résistance à la carbonatation, la résistance aux cycles de gel-dégel et la résistance aux attaques des sulfates. Cependant, il faut utiliser les additions de manière à ce que les propriétés rhéologiques obtenues soient favorables à l'impression [NODEHI et al. 2022].

La composition ainsi que les différents paramètres d'impression peuvent tous avoir des effets considérables sur la porosité. De plus, l'humidité relative et l'environnement dans lequel la cure a eu lieu affectent également la porosité. En effet, une cure dans l'eau peut permettre de réduire significativement la porosité des éléments imprimés en béton [NODEHI et al. 2022]. La distribution des vides dans des éléments en béton imprimés en 3D diffère de celle des éléments fabriqués selon une méthode classique. En général, les vides dans le béton imprimé sont orientés selon la direction d'impression et connectés

plus fortement entre eux. La distribution différente des vides dans le béton imprimé en 3D est à l'origine de l'anisotropie qui se fait remarquer par exemple lorsque les propriétés mécaniques sont testés selon les différentes directions. Différentes études ont révélé cette anisotropie dans les éléments imprimés et ont indiqué que les interfaces entre les couches imprimées influencent fortement la performance de la pièce finale. La porosité, qui est donc différente dans le cas des éléments imprimés que dans le cas des éléments moulés, joue un rôle essentiel pour les propriétés mécaniques à l'état durci ainsi que pour la durabilité de l'élément en béton [Y. ZHANG et al. 2021].

Les différences entre les processus de fabrication classique et par impression 3D conduisent inévitablement à des différences au niveau de la microstructure de l'élément en béton. Lors de l'impression 3D, le béton est pompé vers la buse et ensuite déposé sous forme de couches alors que lors de la fabrication classique, le béton est placé dans un coffrage et vibré. De plus, la fabrication par impression 3D peut conduire à des différences de porosité entre le béton au sein d'une couche et le béton proche des interfaces. De manière générale, les propriétés de porosité (nombre et taille des pores, distribution des pores) dépendent fortement de la composition ainsi que du processus de fabrication (transport, extrusion) [SIKORA et al. 2022].

ZHANG et al. [Y. ZHANG et al. 2021] ont étudié et comparé la résistance aux cycles de gel-dégel des échantillons imprimés et moulés. Pour cela, ils ont testé différents mélanges imprimables avec des rapports E/C de 0,32 et 0,35. La résistance aux cycles de gel-dégel a été testée sur des échantillons de taille $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$ qui ont durci dans une chambre humide avec une température de $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $95\% \pm 5\%$ jusqu'à l'échéance d'essai. La résistance aux cycles de gel-dégel est évaluée via le module d'élasticité dynamique relatif P_n et la perte de masse ΔW_n , qui sont calculés en utilisant les formules suivantes [Y. ZHANG et al. 2021] :

$$P_n = \frac{f_n^2}{f_0^2} \cdot 100 \quad (2.4)$$

avec n représentant le nombre de cycles de gel-dégel, f_n la fréquence transversale de l'échantillon après n cycles et f_0 la fréquence transversale de l'échantillon avant le premier cycle de gel-dégel [Y. ZHANG et al. 2021].

$$\Delta W_n = \frac{W_0 - W_n}{W_0} \cdot 100 \quad (2.5)$$

avec ΔW_n représentant la perte de masse après n cycles de gel-dégel en %, W_n le poids de l'échantillon après n cycles et W_0 le poids initial de l'échantillon [Y. ZHANG et al. 2021].

Lors de leurs essais de gel-dégel, ZHANG et al. [Y. ZHANG et al. 2021] ont observé des tendances différentes pour le module d'élasticité dynamique relatif P_n et la perte de masse ΔW_n . Concernant le module d'élasticité dynamique relatif, les auteurs ont constaté que celui-ci diminue lorsque le nombre de cycles de gel-dégel augmente. Après 200 cycles de gel-dégel, le module d'élasticité dynamique des échantillons imprimés était inférieur à celui des échantillons moulés. Par contre, en termes de perte de masse, c'étaient les échantillons moulés qui ont perdu plus et donc performé moins bien que les échantillons imprimés. En regard des changements du module d'élasticité dynamique lors des cycles de gel-dégel, les auteurs ont conclu que le béton imprimé présente une mauvaise résistance au gel-dégel. Ils expliquent cela par une quantité importante de vides qui peut être trouvée entre les

couches. Ces vides peuvent être remplis avec de l'eau et de la glace ce qui résulte dans des dommages à l'intérieur du béton. Par contre, à la surface, le béton a été compacté lors de l'impression ce qui pourrait expliquer les pertes de masse plus faibles [Y. ZHANG et al. 2021].

Dans leurs études de durabilité, ZHANG et al. [Y. ZHANG et al. 2021] ont non seulement fait des essais sur la résistance au gel mais également sur la migration des ions chlorures, les attaques de sulfates et la carbonatation. En résumé, les auteurs ont trouvé que la résistance aux cycles de gel-dégel ainsi que la résistance à la migration des ions chlorures sont moins bien pour les échantillons imprimés que pour les échantillons moulés. Par contre, en ce qui concerne la résistance aux attaques des sulfates et à la carbonatation, les échantillons imprimés ont présenté des meilleures performances que les échantillons moulés. Finalement, ZHANG et al. [Y. ZHANG et al. 2021] ont également réalisé un essai d'intrusion de mercure ainsi qu'un scan CT afin d'étudier la distribution des pores. Grâce à l'essai d'intrusion de mercure, ils ont trouvé un volume total de pores plus élevé pour les échantillons moulés que pour les échantillons imprimés. Le scan CT a montré que les vides sont indépendants et non connectés dans le cas des échantillons moulés alors qu'ils sont plus connectés au niveau des interfaces et peuvent même être continus dans le cas des échantillons imprimés. De plus, les vides des échantillons imprimés sont moins nombreux et plus petits que ceux des échantillons moulés et en partie orientés dans le sens des filaments imprimés de béton [Y. ZHANG et al. 2021]. Cependant, selon NODEHI et al. [NODEHI et al. 2022], une porosité considérablement différente et concentrée au niveau des interfaces, comme mentionnée par ZHANG et al. [Y. ZHANG et al. 2021], n'a pas pu être observée dans d'autres études. Ces résultats différents peuvent être expliqués par le fait que de nombreux paramètres influencent la porosité et l'adhérence au niveau des interfaces. De tels paramètres sont par exemple la vitesse d'impression, le temps qui passe entre l'impression de deux couches successives, le taux d'humidité et l'utilisation d'additions minérales. La porosité et l'adhérence entre les couches peuvent donc fortement varier d'un cas à l'autre [NODEHI et al. 2022].

SIKORA et al. [SIKORA et al. 2022] ont également réalisé des études pour comparer la microstructure, les propriétés de transport et la durabilité des échantillons imprimés et moulés. En résumé, ils n'ont pas trouvé de différences significatives pour les propriétés de transport et de durabilité même s'ils ont révélé des différences dans les microstructures. Pendant leurs essais, les auteurs ont testé des échantillons moulés et imprimés avec un mortier à base de ciment CEM II et de sable de rivière d'un diamètre inférieur à 2 mm. Les additions minérales contenues dans leur mélange sont des cendres volantes et de la fumée de silice. De plus, un superplastifiant a été utilisé pour rendre le mortier plus facilement imprimable. La vitesse d'impression était de 3000 mm/min et les échantillons étaient stockés dans l'eau à 20°C jusqu'à la réalisation des essais [SIKORA et al. 2022].

Tout d'abord, SIKORA et al. [SIKORA et al. 2022] ont déterminé la masse volumique sèche des échantillons et ont réalisé des essais de porosité accessible à l'eau ainsi que d'absorption d'eau via un essai d'immersion partielle. En termes de masse volumique sèche et de coefficients d'absorption d'eau, aucune différence significative n'a pu être observée et les résultats obtenus pour les échantillons moulés et imprimés étaient similaires. En ce qui concerne la porosité accessible à l'eau, celle-ci était plus importante dans le cas des échantillons imprimés. Les auteurs attribuent cela à la porosité additionnelle au niveau des interfaces qui mène à une absorption d'eau plus importante lorsque les échantillons sont

immergés. Des essais de compression et de flexion ont également été réalisés et ont montré que les échantillons imprimés présentent des résistances inférieures à celles des échantillons moulés ainsi qu'une anisotropie pour la résistance en compression. La résistance aux cycles de gel-dégel a également été testée. Pour cela, des échantillons de taille $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ étaient soumis à des cycles de gel-dégel après 28 jours de cure. Après 25 et 50 cycles de gel-dégel, les résistances en flexion et compression ont été évaluées afin de les comparer avec les résistances initiales. De plus, les changements de masse ont été mesurés. Après 25 et 50 cycles, aucune réduction de la résistance en compression n'a été observée ni pour les échantillons moulés ni pour les échantillons imprimés. En ce qui concerne la résistance en flexion, une légère réduction était perceptible après 50 cycles. Cette légère réduction de résistance en flexion était plus importante pour les échantillons imprimés que pour les échantillons moulés. Contrairement à ZHANG et al. [Y. ZHANG et al. 2021], SIKORA et al. [SIKORA et al. 2022] ont trouvé que la résistance des échantillons soumis à des cycles de gel-dégel était bonne. Les auteurs expliquent cette bonne résistance aux cycles de gel-dégel par la faible absorption d'eau qui est une conséquence de la microstructure dense et homogène du mortier. Cette microstructure est obtenue grâce à la quantité élevée de ciment et au rapport E/C faible. Un essai d'intrusion de mercure a montré que la plupart des pores est de petite taille (pores de gel et petites pores capillaires). En général, la température lors des cycles de gel-dégel ne descend pas suffisamment bas pour que l'eau dans les pores de cette taille commence à geler ce qui explique la bonne résistance des échantillons soumis aux cycles de gel-dégel. Cependant, la porosité est localement plus élevée au niveau des interfaces et les cycles de gel-dégel sont supposés avoir un effet négatif sur les forces d'adhérence ce qui explique pourquoi la perte de résistance en flexion se fait plus remarquer pour les échantillons imprimés [SIKORA et al. 2022].

Afin de caractériser la porosité, SIKORA et al. [SIKORA et al. 2022] ont réalisé un essai d'intrusion de mercure et un scan CT. L'essai d'intrusion de mercure a montré une porosité légèrement plus élevée pour les échantillons moulés que pour les échantillons imprimés. Dans les deux cas, la porosité mesurée était très faible, avec des pores d'un diamètre moyen petit. Le scan CT a également indiqué une porosité un peu plus élevée pour les échantillons moulés que pour les échantillons imprimés ce qui correspond bien aux résultats obtenus par l'essai d'intrusion de mercure. Sur les images obtenues des échantillons imprimés, des couches de pores distribués différemment peuvent être remarquées au niveau des interfaces. De plus, le pourcentage des pores plus petits est plus élevé pour les échantillons imprimés. À l'exception des zones d'interfaces, qui présentent une porosité considérablement plus élevée, les pores sont distribués de manière assez uniforme. La distribution des pores au sein des couches est même plus uniforme que celle dans les échantillons moulés. Cela montre que la qualité du matériau est très bonne au sein des couches mais moindre au niveau des interfaces. La porosité localement plus élevée (au niveau des interfaces) pourrait expliquer les résistances mécaniques plus faibles obtenues lors des essais de compression et de flexion des échantillons imprimés [SIKORA et al. 2022].

Chapitre 3

Matériaux et fabrication

3.1 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés ont été spécialement sélectionnés dans le cadre du projet CIRMAP, afin de développer un mortier imprimable à base de 100 % de sable recyclé. En effet, les matériaux et leur quantité doivent être choisis avec soin afin d'obtenir un mortier approprié pour l'impression 3D, c'est-à-dire un mortier qui vérifie les conditions de pompabilité, d'extrudabilité et de constructibilité.

Ciment

Le ciment utilisé est de type CEM I 52,5 N et fourni par la société Vicat. Il s'agit d'un ciment Portland qui a été fabriqué à l'usine de Créchy. Ce ciment est contenu en grande quantité dans le mortier testé dans le cadre de ce travail de fin d'études et permet au mortier de développer les propriétés nécessaires pour l'impression ainsi que de bonnes résistances mécaniques à l'état durci. Il présente les caractéristiques suivantes :

- Masse volumique : 3160 kg/m³
- Résistance à la compression moyenne après 2 jours : 36 MPa
- Résistance à la compression moyenne après 7 jours : 51 MPa
- Résistance à la compression moyenne après 28 jours : 63 MPa
- Teneur en clinker : 98 %

La fiche technique du ciment reprenant toutes ses caractéristiques est fournie dans l'ANNEXE A.1.

Sable

Afin d'assurer une extrusion aisée et d'éviter tout blocage de la buse, il est conseillé que le diamètre des plus gros grains de sable ne dépasse pas 1/10 du diamètre de la buse [EL CHEIKH et PIÉRARD 2022]. C'est pourquoi le sable est tamisé et uniquement la fraction granulométrique 0/2mm est utilisée. Le diamètre maximal du sable est alors égal à 2mm.

Le sable recyclé utilisé est fourni par le centre de recyclage Tradecowall. Il a été obtenu en broyant et lavant des déchets de béton dans un centre de recyclage localisé en Saint Ghislain en Belgique [Yeakleang MUY, HUBERT, COURARD et al. 2023]. L'absorption d'eau de la partie 0/2mm de ce sable recyclé a été analysée et est en moyenne égale à 5,13% [COURTOIS et al. 2021a].

Le sable naturel utilisé dans le mortier de référence est un sable calcaire concassé venant de la carrière à Saint Bonnet en France [Yeakleang MUY, HUBERT, COURARD et al. 2023]. Les courbes granulométriques des deux types de sable utilisés sont présentées à la FIGURE 3.1 qui montre que les deux types de sable ont une granulométrie très similaire.

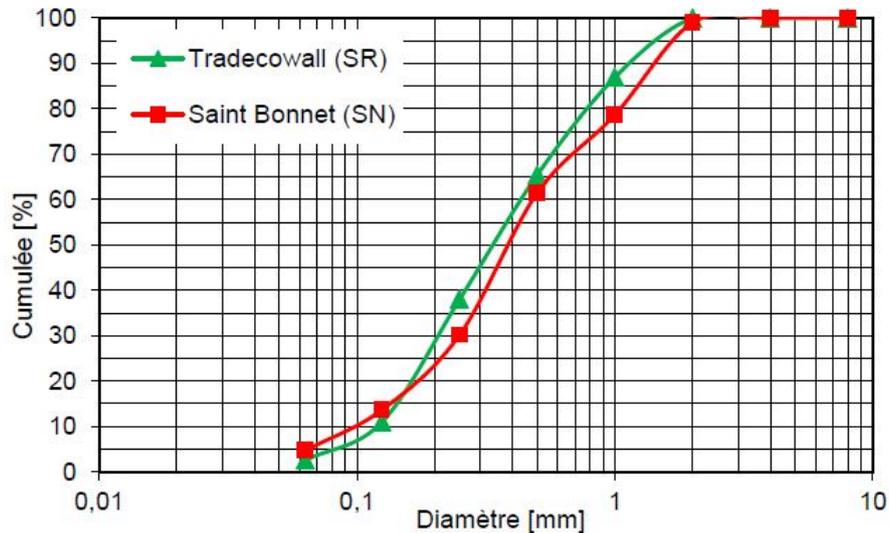


FIGURE 3.1 – Courbes granulométriques [Y. MUY et al. 2023]

Adjuvants

Deux adjuvants sont utilisés dans les deux mortiers testés : un superplastifiant (Chryso®Fluid Optima 100) et un viscosant (Chryso Belitex® Addichap) [Yeakleang MUY, HUBERT, COURARD et al. 2023].

3.2 Composition du mortier

Lors des essais présentés dans la suite de ce travail, deux compositions différentes de mortier seront testées. La première composition a été développée dans le cadre du projet CIRMAP et ne contient que du sable recyclé. La deuxième composition ne contient que du sable naturel et est utilisée comme composition de référence afin d'étudier l'influence du sable recyclé sur les propriétés du mortier. Les compositions sont développées dans le but d'obtenir des mortiers imprimables, et diffèrent par conséquent assez fortement des compositions de mortiers "classiques". En effet, on retrouve des adjuvants (superplastifiant et viscosant), une quantité très importante de ciment et un rapport E/C faible pour les deux compositions présentées.

La TABLE 3.1 présente la composition du mortier à base de sable recyclé. Cette composition a été développée grâce à l'essai au pistolet qui sera décrit plus en détail dans la partie concernant les essais à l'état frais [COURTOIS et al. 2021c]. De l'eau supplémentaire est ajoutée dans le mélange afin de prendre en compte l'absorption d'eau du sable recyclé. Les quantités indiquées sont ceux nécessaires pour obtenir 1 litre de mortier.

Matériau	Quantité [g]	Pourcentage massique
Ciment Vicat	905	40,4 %
Sable recyclé TradecoWall	995,57	44,5 %
Eau efficace	262,45	11,7 %
Eau d'absorption	51,88	2,3 %
Superplastifiant (Optima 100)	22,63	1 %
Viscosant	1,81	0,1 %

TABLE 3.1 – Composition pour 1 litre de mortier à base de sable recyclé

Les caractéristiques de cette composition sont les suivantes :

- Rapport eau efficace - ciment : $E_{eff}/C = 0,29$
- Rapport superplastifiant - ciment : $SP/C = 0,025 = 2,5 \%$
- Rapport viscosant - ciment : $VMA/C = 0,002 = 0,2 \%$

Par la suite, la composition du mortier de référence à base de sable naturel a été obtenue en faisant une substitution en terme de masse du sable. Les quantités massiques sont donc les mêmes que pour la composition à base de sable recyclé, à l'exception de la quantité d'eau d'absorption qui est plus faible puisque le sable naturel absorbe moins d'eau que le sable recyclé. La composition du mortier à base de sable naturel est présentée à la TABLE 3.2. À nouveau, les quantités indiquées sont ceux nécessaires pour obtenir 1 litre de mortier.

Matériau	Quantité [g]
Ciment Vicat	905
Sable naturel Saint Bonnet	995,57
Eau efficace	262,45
Eau d'absorption	5,18
Superplastifiant (Optima 100)	22,63
Viscosant	1,81

TABLE 3.2 – Composition pour 1 litre de mortier à base de sable naturel

3.3 Fabrication des échantillons

Pour la majorité des essais présentés dans la suite, trois types d'échantillons seront testés :

1. Des échantillons moulés avec le mortier de référence à base de sable naturel,
2. Des échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé développé dans le cadre du projet CIRMAP,
3. Des échantillons imprimés avec le mortier à base de sable recyclé.

La comparaison des résultats obtenus lors des différents essais pour ces trois séries d'échantillons permettra ensuite de mettre en évidence d'une part l'influence de la substitution du sable naturel par du sable recyclé et d'autre part l'influence du mode de fabrication par impression 3D.

3.3.1 Fabrication des échantillons moulés

Différents échantillons doivent être fabriqués pour les différents essais. Lors de la plupart des essais (flexion, compression, absorption d'eau, carbonatation), des barrettes prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ sont testés. Pour les essais de cisaillement, des cubes de dimensions $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ sont utilisés. Ceux-ci peuvent être obtenus en découpant les barrettes prismatiques. Pour les essais de porosité, les barrettes prismatiques sont découpées en trois et les morceaux obtenus sont testés. Les cylindres de 5 cm de diamètre et 5 cm de hauteur testés lors des essais de traction directe sont obtenus par carottage dans des cubes fabriqués. Finalement, les échantillons testés lors des essais de gel-dégel sont des cylindres de 11,3 cm de diamètre et 5 cm de hauteur. Ces échantillons sont également obtenus à partir de cubes de dimensions $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$.

Les mortiers sont fabriqués selon les compositions mentionnées à la section précédente. Une série produite est toujours composée de trois barrettes de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Une légère quantité de mortier est fabriquée en surplus afin de garantir un bon remplissage du moule. La FIGURE 3.2a montre les matériaux pesés pour la fabrication d'une série de trois barrettes. La fabrication des barrettes est normalisée (NF EN 196-1) et tout le matériel utilisé est conforme aux normes.

Dans le cas du mortier à base de sable recyclé, sa fabrication se compose de deux phases successives : la pré-saturation du sable qui dure 5 minutes au total, suivie par le mélange du mortier qui dure 4 minutes au total. Le malaxeur utilisé est un malaxeur standardisé conforme aux normes avec une capacité maximale de 5 litres. Le protocole de malaxage à respecter est le suivant [COURTOIS et al. 2021c] :

1. Introduction du sable recyclé et de l'eau dans le malaxeur,
2. Malaxage à la vitesse 1 (basse vitesse) pendant 30 secondes,
3. Malaxage à la main pendant 30 secondes (*hand scraping*),
4. Pause pendant 4 minutes,
5. Ajout du ciment, superplastifiant et viscosant dans le malaxeur, malaxage à la vitesse 1 (basse vitesse) pendant 30 secondes,
6. Malaxage à la vitesse 2 (haute vitesse) pendant 30 secondes,
7. Malaxage à la main pendant 30 secondes,
8. Malaxage à la vitesse 2 (haute vitesse) pendant 2 minutes 30 secondes [COURTOIS et al. 2021c].

Dans le cas du mortier à base de sable naturel, la procédure à suivre est la même, sauf que la première des deux phases est abandonnée. Le sable naturel ne doit pas être pré-saturé et tous les ingrédients sont directement introduits dans le malaxeur. Dans ce cas, on commence directement à l'étape 5 du protocole décrit ci-dessus. Les FIGURES 3.2b et 3.2c montrent les phases de pré-saturation du sable recyclé et de malaxage du mortier.



(a) Matériaux



(b) Pré-saturation du sable recyclé



(c) Malaxage du mortier

FIGURE 3.2 – Fabrication du mortier

Le remplissage des moules se fait en utilisant une table à choc, visible sur la FIGURE 3.3. Pour cela, un peu plus que la moitié du moule est remplie avec du mortier et le moule est fixé sur la table à choc. Le mortier dans le moule est alors compacté en appliquant 60 coups avec la table à choc. Après ces 60 coups, la surface des trois parties du moule remplies à moitié est rendue un peu rugueuse à l'aide d'une spatule avant de remplir la deuxième moitié. Afin d'obtenir un moule bien rempli après le compactage, un peu plus de mortier que nécessaire est placé dans le moule. Ensuite, 60 coups sont à nouveau appliqués avec la table à secousses. Finalement, l'excès du mortier est arasé avec une règle métallique afin d'obtenir une surface bien lisse. Le moule finalement rempli est montré à la FIGURE 3.4.



FIGURE 3.3 – Table à secousses



FIGURE 3.4 – Moule utilisé pour la fabrication des barrettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$

Une fois le moule rempli, celui-ci est placé dans la chambre humide pendant 24 heures. La température dans cette chambre humide est de $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, et l'humidité relative est de $95\% \pm 5\%$. Après 24 heures, les barrettes sont démoulées et immergées dans un bac d'eau se trouvant dans la chambre humide, jusqu'au début de chaque essai.



FIGURE 3.5 – Stockage des échantillons dans l'eau

Pour les essais de gel-dégel, des cubes de dimensions $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ sont fabriqués. Puisque cela nécessite des quantités plus importantes de mortier, un malaxeur plus grand, visible sur la FIGURE 3.6a, est utilisé. À cause de la quantité beaucoup plus importante de matériaux à mélanger, le protocole de malaxage diffère de celui de la fabrication des barrettes. Afin de garantir un bon mélange de toutes les composantes, le sable, le ciment et l'eau sont ajoutés par tiers. La procédure suivie est alors la suivante : Les premiers tiers de sable, ciment et eau sont mis dans le malaxeur et mélangés pendant 5 minutes. Ensuite, les deuxièmes tiers de sable, ciment et eau sont ajoutés, ainsi que le superplastifiant et le viscosant. À nouveau, on mélange pendant 5 minutes, avant d'introduire les derniers tiers des matériaux et de mélanger encore une fois pendant 5 minutes.



(a) Malaxeur et matériaux



(b) Cubes avant démoulage



(c) Cubes après démoulage

FIGURE 3.6 – Fabrication des cubes $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$

Comme les moules pour les barrettes, les moules cubiques sont également remplis en deux fois. Après avoir rempli la moitié du moule cubique par du mortier, celui-ci est compacté

pour environ 20 secondes avec une table vibrante. Ensuite, la deuxième moitié du moule est remplie et le mortier dans le moule est vibré pour une deuxième fois. Les moules cubiques remplis sont ensuite placés dans la chambre humide. Après 24 heures, ils sont démoulés et les cubes fabriqués sont stockés dans la chambre humide, jusqu'à leur utilisation lors des essais (FIGURES 3.6b et 3.6c).

Les échantillons pour les essais de gel-dégel sont ensuite fabriqués à partir de ces cubes de dimensions 15 x 15 x 15 cm³ en suivant les prescriptions de la norme NBN EN 12390-2. Lorsque les cubes ont un âge entre 21 et 28 jours, un cylindre de 11,3 cm de diamètre est extrait de chaque cube. Le forage se fait dans une direction perpendiculaire à la direction de coulage, c'est-à-dire en allant d'une face latérale du cube à l'autre. Ensuite, le cylindre est scié afin d'obtenir deux disques de 5 cm de hauteur. Après 28 jours, les échantillons sont placés dans un environnement sec à une température de 20°C ± 2°C et une humidité relative de 60% ± 5% pour une durée de 14 jours [NOTE RÉGLEMENTAIRE POUR FICHES TECHNIQUES, NOTES JUSTIFICATIVES ET ÉTUDES PRÉLIMINAIRES, RNR 50-1, 2019].

Après les 14 jours de conditionnement à sec, les échantillons sont placés dans des tuyaux PVC, et de la résine époxydique est appliquée entre le tuyau PVC et l'échantillon cylindrique (FIGURES 3.7a et 3.7b) en deux couches qui durcissent chacune pendant 24 heures. Il est important de s'assurer qu'il n'y a pas de résine sur la surface d'essai. Une fois la résine a durci, une couche d'eau déminéralisée de 3 mm est mise sur la surface d'essai pendant 72 heures. Finalement, une isolation thermique est encore mise en place (FIGURE 3.7c) [NOTE RÉGLEMENTAIRE POUR FICHES TECHNIQUES, NOTES JUSTIFICATIVES ET ÉTUDES PRÉLIMINAIRES, RNR 50-1, 2019].

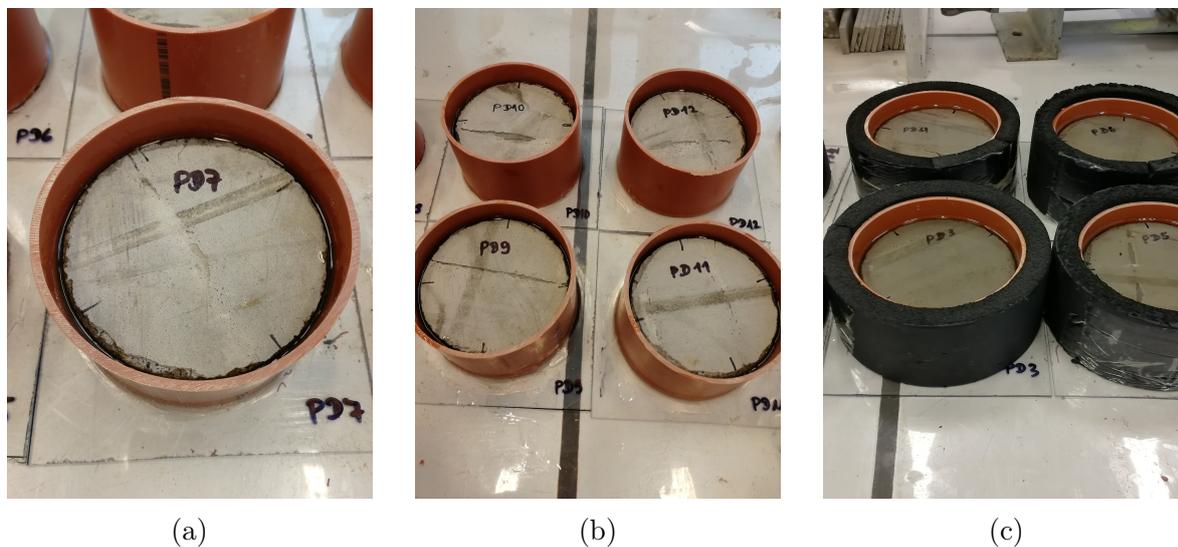


FIGURE 3.7 – Préparation des échantillons pour les essais de gel-dégel

3.3.2 Fabrication des échantillons imprimés

Dans le cadre du projet CIRMAP, l'Université de Liège a réalisé des impressions à deux endroits différents : chez IMT Nord Europe à Douai et chez BuildWise à Limelette. La composition du mortier imprimé était celle établie dans le projet CIRMAP ce qui signifie qu'il s'agit d'un mortier à base de 100 % de sable recyclé et sans sable naturel. Ces impressions ont permis de sortir des échantillons qui par la suite ont été testés au laboratoire

de l'Université de Liège. Cela permet de comparer les résultats des différents essais sur les échantillons imprimés avec ceux des échantillons moulés et de détecter ainsi l'influence que le mode de fabrication par impression a sur les différentes propriétés de la pièce finale.

Chaque système d'impression étant un peu différent, il fallait d'abord quelques essais afin d'adapter le système à la nouvelle composition de mortier à imprimer. Par exemple, à Douai, il était possible d'incorporer le viscosant directement dans le mortier et de pomper le mélange ensuite vers la buse de l'imprimante. Par contre, à Limelette, la pompe n'était pas capable de pomper le mélange contenant déjà le viscosant correctement vers la buse. C'est pourquoi il était nécessaire de diluer le viscosant dans quelques litres d'eau et de l'ajouter au mélange au niveau de la buse. La FIGURE 3.8 montre l'imprimante de type bras robotique utilisée à Limelette. Ensuite, les échantillons sont obtenus à partir des "formes en S" qui sont imprimés, comme représenté à la FIGURE 3.9. L'impression de cette forme permet d'avoir un chemin d'impression bien continu.



FIGURE 3.8 – Le robot pour l'impression 3D chez BuildWise à Limelette



FIGURE 3.9 – Impression d'une "forme en S" à Limelette

La FIGURE 3.10a montre la pièce imprimée de plus près, de manière à ce qu'on peut bien voir les différentes couches et la finition nervurée. La pièce finale a une hauteur de 6 à 7 couches successives imprimées, avec une hauteur d'environ 1 cm par couche. 2 à 3 heures après l'impression, lorsque le béton est encore mou, la forme en S imprimée est divisée en plus petites morceaux (FIGURE 3.10b). Les morceaux obtenus à partir de la forme en S sont ensuite placés dans une chambre humide pendant que le mortier durcit. Finalement, le jour où on veut démarrer un essai sur les échantillons imprimés, les morceaux de la forme en S sont découpés pour obtenir des barrettes de taille $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ou des cubes de taille $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$. Il est également possible de carotter afin d'obtenir les cylindres utilisés pour les essais de traction directe.



(a) Pièce finale imprimée



(b) Découpage de la pièce imprimée



(c) Morceaux pour la fabrication des barrettes

FIGURE 3.10 – Fabrication des échantillons imprimés

La FIGURE 3.10c montre les morceaux imprimés avant le découpage des barrettes. On peut voir que les couches, bien visibles sur les faces latérales non encore découpées, ne sont pas identifiables sur les surfaces de devant et derrière. Cela est favorable d'un point de vue des résistances mécaniques puisque des interfaces bien remarquables constitueraient un point faible de la pièce. Les flèches sur les échantillons indiquent le sens dans lequel les couches ont été déposées. Cela est important lors des essais afin de savoir dans quel sens (sens de pose ou sens perpendiculaire) les propriétés et résistances sont évaluées.

Chapitre 4

Approche expérimentale et résultats obtenus

Une partie des résultats présentées dans ce quatrième chapitre a déjà été obtenue avant le début de ce travail de fin d'études par Yeakleang Muy et Julien Hubert qui travaillent sur le projet CIRMAP. L'inclusion de leurs résultats a permis une approche expérimentale sur une plus grande base de données. Les parties dans lesquelles des résultats de Yeakleang Muy et Julien Hubert ont été inclus sont les essais de compression et de flexion, les essais d'adhérence, les essais de porosité et les essais d'absorption d'eau.

4.1 Propriétés à l'état frais

4.1.1 Table à secousses (*Flow table test*)

Méthode

Un premier essai à l'état frais est l'essai à la table à secousses (*flow table test*), pendant lequel l'affaissement et l'étalement du mortier sont mesurés. Cet essai est normalisé selon la norme NBN EN 1015-3. Il est réalisé directement après la fabrication du mortier et permet de comparer la fluidité du mortier à base de sable recyclé avec la fluidité du mortier à base de sable naturel. Le moule conique utilisé lors de cet essai a une hauteur de 6 cm, un diamètre en bas de 10 cm et un diamètre en haut de 7 cm [COURTOIS et al. 2021b]. La démarche à suivre pour préparer cet essai est la suivante [COURTOIS et al. 2021b] :

1. La table et le moule conique sont légèrement humidifiés.
2. La moitié du moule cylindrique est remplie par du mortier.
3. Un cylindre (visible sur la FIGURE 4.1b devant la table) est lâché 10 fois sur le mortier dans le cône afin de le compacter.
4. La deuxième moitié du cône est remplie, avec un peu de mortier en surplus qui déborde du cône.
5. Le cylindre est à nouveau lâché 10 fois sur le mortier dans le cône.
6. L'excès de mortier sur le cône est arasé avec une règle métallique afin d'obtenir une surface lisse [COURTOIS et al. 2021b].

La FIGURE 4.1a montre le cône rempli de mortier après la phase de préparation de l'essai.

Ensuite, l'affaissement et l'étalement du mortier peuvent être mesurés en suivant la procédure suivante [COURTOIS et al. 2021b] :

1. Le moule conique est enlevé.
2. L'affaissement du mortier est mesuré à trois endroits différents à l'aide d'un pied à coulisse, et la moyenne des trois valeurs est prise en compte.
3. 15 coups sont appliqués avec la table à secousses.
4. L'étalement du mortier est mesuré dans deux directions perpendiculaires à l'aide d'un pied à coulisse, et la moyenne des deux valeurs est prise en compte.
5. 10 coups sont appliqués avec la table à secousses.
6. L'étalement du mortier est mesuré dans deux directions perpendiculaires à l'aide d'un pied à coulisse, et la moyenne des deux valeurs est prise en compte [COURTOIS et al. 2021b].



(a) Remplissage du cône



(b) Affaissement



(c) Étalement

FIGURE 4.1 – *Flow table test*

Résultats

L'essai à la table à secousses a été réalisé lors de la fabrication des barrettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ avant de placer le mortier dans les moules prismatiques. Pour chacune des deux compositions, cet essai a été réalisé pour sept séries différentes. Les résultats obtenus pour l'affaissement, l'étalement après 15 coups et l'étalement après 25 coups sont présentés dans les TABLES 4.1 (pour le mortier à base de sable naturel) et 4.2 (pour le mortier à base de sable recyclé). De plus, on peut encore mentionner que pour chacune des séries testées, le mortier garde bien sa forme après avoir enlevé le moule conique et s'affaisse que très peu, comme le montre la FIGURE 4.1b.

Mortier à base de sable naturel	Affaissement moyen [mm]	Étalement moyen après 15 coups [mm]	Étalement moyen après 25 coups [mm]
Série 1	2	116,1	124,2
Série 2	4,1	122,2	132,5
Série 3	1,6	127,9	140,7
Série 4	3,5	117,6	127,7
Série 5	3,4	120,7	133
Série 6	3	123,5	133,5
Série 7	4,4	125,5	135,5
Moyenne	3,14	121,92	132,44
Écart-type	1,03	4,19	5,31

TABLE 4.1 – Affaissement et étalement du mortier à base de sable naturel

Mortier à base de sable recyclé	Affaissement moyen [mm]	Étalement moyen après 15 coups [mm]	Étalement moyen après 25 coups [mm]
Série 1	6,6	120,2	133,5
Série 2	3	119,4	130,9
Série 3	2,4	122,7	134,4
Série 4	2,4	121,9	131,6
Série 5	6,2	124,8	133,9
Série 6	6,3	129,2	141,2
Série 7	3,4	125	135,7
Moyenne	4,33	123,31	134,46
Écart-type	1,94	3,34	3,39

TABLE 4.2 – Affaissement et étalement du mortier à base de sable recyclé

L'affaissement moyen est de 3,14 mm dans le cas du mortier à base de sable recyclé alors qu'avec 4,33 mm, il est un peu plus élevé dans le cas du mortier à base de sable naturel. Cependant, l'écart-type est assez élevé dans les deux cas, surtout pour le mortier à base de sable recyclé, ce qui indique que l'affaissement peut varier fortement. De plus, il est difficile de mesurer l'affaissement avec une précision élevée puisqu'on se trouve à l'ordre de grandeur du millimètre.

La précision est déjà bien meilleure pour les mesures d'étalement où l'ordre de grandeur est d'une dizaine de centimètres. Après 15 coups appliqués à l'aide de la table à secousses, l'étalement moyen est de 121,92 mm dans le cas du mortier à base de sable naturel et de 123,31 mm dans le cas du mortier à base de sable recyclé. L'étalement après 15 coups est donc un peu plus élevé dans le cas du mortier à base de sable recyclé. Cette même tendance peut être observée après 25 coups où l'étalement moyen est de 132,44 mm dans le cas du mortier à base de sable naturel et de 134,46 mm dans le cas du mortier à base de sable recyclé. Cependant, la différence observée s'élevant à environ 2 mm est minime, que ce soit pour l'étalement après 15 coups ou pour l'étalement après 25 coups. Globalement, on peut donc conclure que la fluidité est très similaire pour les deux compositions de mortier testées.

4.1.2 Essai au pistolet

Méthode

Lors du développement de la composition du mortier à base de sable recyclé dans le cadre du projet CIRMAP, un essai au pistolet a été utilisé afin de tester l'imprimabilité du mortier à plus petite échelle. Ce pistolet, visible sur les FIGURES 4.2 et 4.3, permet de tester les propriétés d'extrudabilité et de constructibilité à l'échelle du laboratoire, sans devoir utiliser une grande imprimante 3D. Sur base de cet essai, la composition du mortier a été adaptée et optimisée à plusieurs reprises, jusqu'à arriver à un mortier comportant des propriétés rhéologiques optimales pour l'impression. C'est cette composition de mortier finalement obtenue qui a été utilisée dans le cadre de ce travail de fin d'études. Différents critères étaient testés lors de l'optimisation de la composition du mortier. Il faut par exemple que le mortier soit suffisamment fluide pour l'extruder aisément avec le pistolet, et cela pendant au moins 30 minutes. En même temps, il faut que plusieurs couches puissent être empilées grâce au pistolet sans qu'une rupture ait lieu. Un autre critère qui était pris en compte est la qualité de la surface, le but étant d'avoir le moins de fissures possible [COURTOIS et al. 2021c].



FIGURE 4.2 – Pistolet utilisé pour simuler l'impression



FIGURE 4.3 – Essai au pistolet

Le pistolet a une buse de 1 cm de diamètre. Lors de l'essai, de petits murs de 4 couches de hauteur sont imprimés avec le pistolet à différents moments, jusqu'à ce que le mortier devienne trop ferme et ne puisse plus être imprimé. Cet essai au pistolet n'est pas normalisé [COURTOIS et al. 2021c]. Son but dans le cadre de ce travail est de comparer l'imprimabilité du mortier à base de sable naturel à celle du mortier à base de sable recyclé. Pour cela, de petits murs de 4 couches de hauteur sont imprimés grâce au pistolet toutes les 10 minutes et ce pour les deux compositions. Entre deux impressions, c'est-à-dire toutes les 10 minutes, le mortier est re-malaxé pendant 30 secondes.

Résultats

Dans un premier temps, le mortier à base de sable recyclé a été testé après 10, 20, 30, 40, 50 et 60 minutes. Les résultats obtenus sont montrés sur la FIGURE 4.4.



FIGURE 4.4 – Essais d’extrudabilité sur le mortier à base de sable recyclé après 10, 20, 30, 40, 50 et 60 minutes de contact entre l’eau et le ciment

Lors de l’essai au pistolet avec le mortier à base de sable recyclé, les observations suivantes ont été faites : Jusqu’à une durée de 30 minutes après la fabrication du mortier, il était possible d’imprimer de petits murs avec le pistolet sans aucun problème. Après 40 minutes, l’impression était toujours aisée, mais avec plus de petites fissures qui apparaissaient. Après 50 et 60 minutes, il était encore faisable d’imprimer de petits murs, mais la pression qui devait être appliquée pour cela sur le pistolet était plus élevée. De plus, il était plus difficile d’empiler les couches à cause de cordons qui avaient tendance à devenir discontinus. La qualité de la surface était également moins bonne, avec des fissures plus importantes. En se basant sur l’essai au pistolet, il peut alors être conclu que l’extrudabilité et la constructibilité sont suffisantes jusqu’à une durée de 30 à 40 minutes après le premier contact entre le ciment et l’eau.

Ensuite, le même essai a été réalisé une deuxième fois, mais cette fois-ci avec le mortier à base de sable naturel. Afin d’étudier l’influence du sable recyclé sur les propriétés du mortier, ce mortier à base de sable naturel est utilisé comme mortier de référence lors des différents essais. L’essai au pistolet permet alors de tester si ce mortier de référence a des propriétés rhéologiques similaires au mortier à base de sable recyclé et s’il se prête

également bien à l'impression. Les résultats obtenus pour le mortier à base de sable naturel après 10, 20, 30, 40, 50 et 60 minutes sont montrés sur la FIGURE 4.5.

Les observations qui étaient faites lors de l'essai au pistolet avec le mortier à base de sable naturel sont similaires à celles de l'essai avec le mortier à base de sable recyclé. Jusqu'à une durée de 40 minutes, le mortier à base de sable naturel se laissait bien extruder et empiler par couches, avec une bonne qualité de surface, sans fissures importantes. À partir de 50 minutes, la construction de petits murs avec le pistolet devenait plus dure. En effet, la pression à appliquer pour l'extrusion était plus importante, et l'obtention de cordons continus qui ne se rompent pas devenait plus difficile. La qualité de surface était également moins bonne, avec des fissures plus remarquables. En résumé, on peut dire que le mortier à base de sable naturel présente une bonne extrudabilité ainsi qu'une bonne constructibilité jusqu'à une durée de 40 minutes après le premier contact entre le ciment et l'eau.



FIGURE 4.5 – Essais d'extrudabilité sur le mortier à base de sable naturel après 10, 20, 30, 40, 50 et 60 minutes de contact entre l'eau et le ciment

En conclusion, les propriétés rhéologiques et l'imprimabilité du mortier à base de sable recyclé et du mortier à base de sable naturel sont très similaires ce qui est préférable

puisque le mortier à base de sable naturel est utilisé comme mortier de référence lors des essais à l'état durci. Lors de l'essai au pistolet, les deux mortiers présentent une bonne extrudabilité et constructibilité ainsi qu'une bonne qualité de surface jusqu'à une durée de 30 à 40 minutes.

4.2 Adhérence

Méthode

Dans la revue de littérature, il a été décrit que les interfaces entre les couches sont souvent les points faibles de la pièce imprimée et que l'adhérence entre les couches est un paramètre ayant une influence importante sur les propriétés à l'état durci. Afin d'étudier l'adhérence entre les couches des échantillons imprimés, des essais de traction directe et de cisaillement ont été réalisés jusqu'à la rupture. À partir du schéma de rupture obtenu, il est alors possible de déterminer si l'interface entre les couches constitue un plan de faiblesse de l'échantillon imprimé ou pas.

Pour les essais de cisaillement et de traction directe, il est important que les positions approximatives des interfaces entre les couches soient indiquées avec de la craie jaune sur les échantillons lors du découpage. En effet, sur les bords de la pièce imprimée, les différentes couches et la finition nervurée typique sont bien visibles, alors qu'au milieu, aucune interface ne peut être remarquée. Il faut noter que ce marquage des interfaces n'est pas très précis et donne uniquement une approximation sur les positions des interfaces. En effet, puisque les interfaces ne sont pas visibles au sein de la pièce imprimée, il s'agit d'une simple déduction géométrique à partir des interfaces visibles sur les bords. Des cubes de taille $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ ont ensuite été découpés et testés en cisaillement (FIGURES 4.6a et 4.6b). De plus, des cylindres de 5 cm de diamètre et de 5 cm de hauteur ont été carottés et testés en traction directe (FIGURE 4.6c). Les essais de cisaillement et de traction directe ont été réalisés avec la machine INSTRON 5585. La vitesse de mise en contrainte était de $0,1 \text{ MPa/s}$ lors des essais de traction et de $0,9 \text{ kN/min}$ lors des essais de cisaillement.

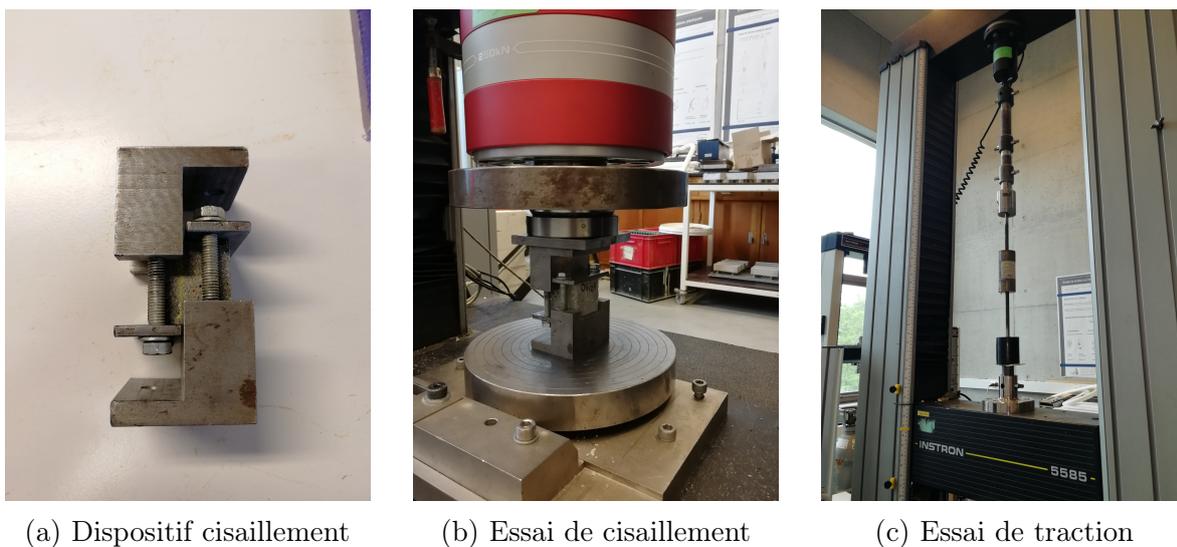


FIGURE 4.6 – Essais de cisaillement et de traction directe

Résultats

Concernant les essais de cisaillement, trois cubes $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ provenant de pièces imprimées à Limelette ont été testés après 28 jours. La moyenne des trois valeurs de résistance mesurées est égale à 7,47 MPa. Ces trois cubes peuvent être vus sur la FIGURE 4.7. De plus, des cubes $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ provenant de pièces imprimées à Douai ont également été testés en cisaillement, après 56 et 91 jours. Après 56 jours, la résistance en cisaillement moyenne, obtenue à partir de trois échantillons testés, était de 7,71 MPa alors qu'elle était de 8,93 MPa après 91 jours. Les trois cubes testés après 91 jours sont visibles sur la FIGURE 4.8. L'ensemble des résultats obtenus peut être trouvé dans l'ANNEXE A.2. Il semble donc que la résistance en cisaillement augmente encore légèrement au-delà des 28 jours. Le but étant d'étudier l'adhérence des couches, on s'intéresse principalement aux schémas de rupture obtenus. Les plans de rupture ne semblent pas se produire systématiquement sur les interfaces qui sont dessinés en jaune sur les échantillons. En effet, en regardant les FIGURES 4.7 et 4.8, il n'est pas possible de retrouver un même schéma de rupture qui se reproduit pour les différents cubes testés. Cela est une indication que l'adhérence entre couches n'est pas plus faible que la cohésion au sein d'une couche.



FIGURE 4.7 – Rupture en cisaillement - Échantillons imprimés à Limelette, après 28 jours

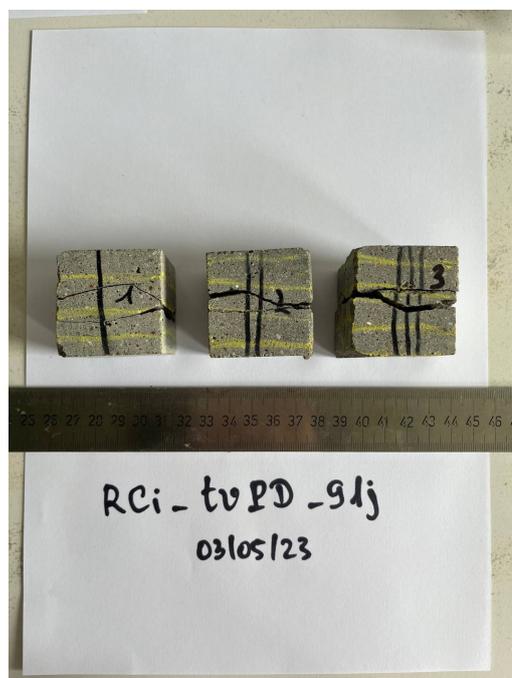


FIGURE 4.8 – Rupture en cisaillement - Échantillons imprimés à Douai, après 91 jours

Des essais de traction ont été réalisés sur des cylindres de 5 cm de diamètre et 5 cm de hauteur, obtenus par carottage dans des pièces imprimées. La vitesse de mise en contrainte lors des essais était de 0,1 MPa/s. Les résistances mesurées après différentes périodes de temps pour des pièces imprimées à Douai sont notées dans la TABLE 4.3. Ces valeurs données correspondent à une moyenne (\pm écart-type) sur trois échantillons testés. L'ensemble des résultats obtenus peut être trouvé dans l'ANNEXE A.3. Il est visible dans la TABLE 4.3 que la résistance en traction augmente au cours du temps pour atteindre un maximum de 2,7 MPa après 56 jours. Par contre, à 90 jours, la résistance en traction mesurée est plus faible avec 2,2 MPa. Cependant, il ne faut pas oublier que la moyenne calculée ne se

base que sur trois échantillons testés.

7 jours	28 jours	56 jours	90 jours
$2 \pm 0,1$	$2,5 \pm 0,2$	$2,7 \pm 0,3$	$2,2 \pm 0,1$

TABLE 4.3 – Résistance en traction directe pour les échantillons imprimés à Douai [MPa]

Pour des raisons de comparaison de résistance, trois cylindres provenant d'une pièce moulée ont également été testés en traction, 90 jours après leur fabrication. La composition du mortier était la même que celle des pièces imprimées (100% de sable recyclé). La contrainte de rupture moyenne pour les trois cylindres testés était de 2,9 MPa et donc légèrement plus élevée que les contraintes de rupture obtenus pour les échantillons imprimés (31,8% plus élevée que la résistance à 90 jours et 7,4% plus élevée que la résistance à 56 jours des échantillons imprimés à Douai). On peut tout de même noter que les échantillons imprimés ainsi que les échantillons moulés atteignent tous les deux des résistances en traction directe dépassant les 2 MPa ce qui représente de résultats pour un matériau cimentaire.

Des exemples des schémas de rupture obtenus sont donnés sur les FIGURES 4.9 et 4.10. La FIGURE 4.9 montre des échantillons obtenus à partir de pièces imprimées à Limelette qui ont été testés après 28 jours. La FIGURE 4.10 montre des échantillons obtenus à partir de pièces imprimées à Douai et testés après 91 jours. Si les interfaces entre les couches constituaient des plans de faiblesse, cela se verrait bien à partir des schémas de rupture obtenus. En effet, en traction directe, la rupture commence toujours au point de la plus faible résistance. Cela signifie que si un plan de faiblesse existe dans l'échantillon, il y a deux possibilités : soit la rupture est initiée directement au plan de faiblesse, soit elle commence à un défaut local pour ensuite aller rejoindre le plan de faiblesse, tout en suivant le chemin de plus faible résistance.



FIGURE 4.9 – Rupture en traction - Échantillons imprimés à Limelette, après 28 jours



FIGURE 4.10 – Rupture en traction - Échantillons imprimés à Douai, après 91 jours

En regardant les FIGURES 4.9 et 4.10, on peut remarquer que les plans de rupture en traction directe ne se produisent pas systématiquement le long des interfaces. Au contraire, pour la plupart des échantillons testés, la rupture a lieu au milieu d'une couche, entre deux interfaces. Les interfaces entre les couches ne semblent donc pas être particulièrement plus faibles que le reste de l'échantillon cylindrique. Il est alors possible de conclure sur base de ces schémas de rupture qu'il n'y a ni de chemin de plus faible résistance préféré, ni de plan de faiblesse au niveau d'une interface. Cela signifie que l'adhérence entre couches est au moins aussi bonne que la cohésion du matériau en soi. Par conséquent, on peut s'attendre à avoir des propriétés mécaniques isotropes.

La bonne adhérence entre les couches et le fait que les couches ne sont pas visibles au sein des pièces imprimées peuvent être expliqués par la composition du mortier utilisé. En effet, dans la plupart des mortiers pour l'impression 3D, des accélérateurs de prise sont incorporés dans le mélange. L'utilisation d'accélérateur de prise dans la formulation du mortier/béton a comme conséquence que la résistance au jeune âge augmente, mais qu'en même temps, des joints froids entre les couches risquent de se former. La littérature montre que l'utilisation d'un accélérateur de prise peut conduire à une anisotropie et des interfaces entre couches bien visibles. Au contraire, les adjuvants utilisés dans le mortier développé lors du projet CIRMAP sont un superplastifiant et un viscosant, et on ne retrouve pas d'accélérateur de prise. De plus, en relation avec cela, la vitesse de déplacement de la buse lors de l'impression est assez lente comparé à d'autres projets. L'absence de l'accélérateur est donc présumée être à l'origine de la bonne adhérence observée lors des essais.

4.3 Résistances en compression et en flexion

Méthode

Afin d'évaluer l'influence du sable recyclé ainsi que du processus de fabrication par impression 3D sur les propriétés à l'état durci du mortier, des essais de compression et de flexion ont été réalisés pour les quatre séries d'échantillons différentes suivantes :

1. Des échantillons moulés avec la composition de mortier de référence contenant 100% de sable naturel de Saint Bonnet,
2. Des échantillons moulés avec la composition de mortier contenant 100% de sable recyclé de Tradecowall,
3. Des échantillons imprimés à Douai avec la composition de mortier contenant 100% de sable recyclé de Tradecowall et testés dans le sens de pose,
4. Des échantillons imprimés à Douai avec la composition de mortier contenant 100% de sable recyclé de Tradecowall et testés dans le sens perpendiculaire à la pose.

La FIGURE 4.11 illustre les deux directions dans lesquelles les échantillons imprimés sont testés en compression et en flexion. Par "échantillons testés dans le sens de pose", on entend des échantillons testés comme montré sur l'image à droite de la FIGURE 4.11, c'est-à-dire sous une charge parallèle à l'axe défini comme axe Z. Par "échantillons testés dans le sens perpendiculaire à la pose", on entend des échantillons testés comme montré sur l'image au milieu de la FIGURE 4.11, c'est-à-dire sous une charge parallèle à l'axe défini comme axe Y. La troisième direction possible, c'est-à-dire sous une charge parallèle à l'axe défini comme axe X (image de gauche), n'est pas testée dans le cadre de ce travail.

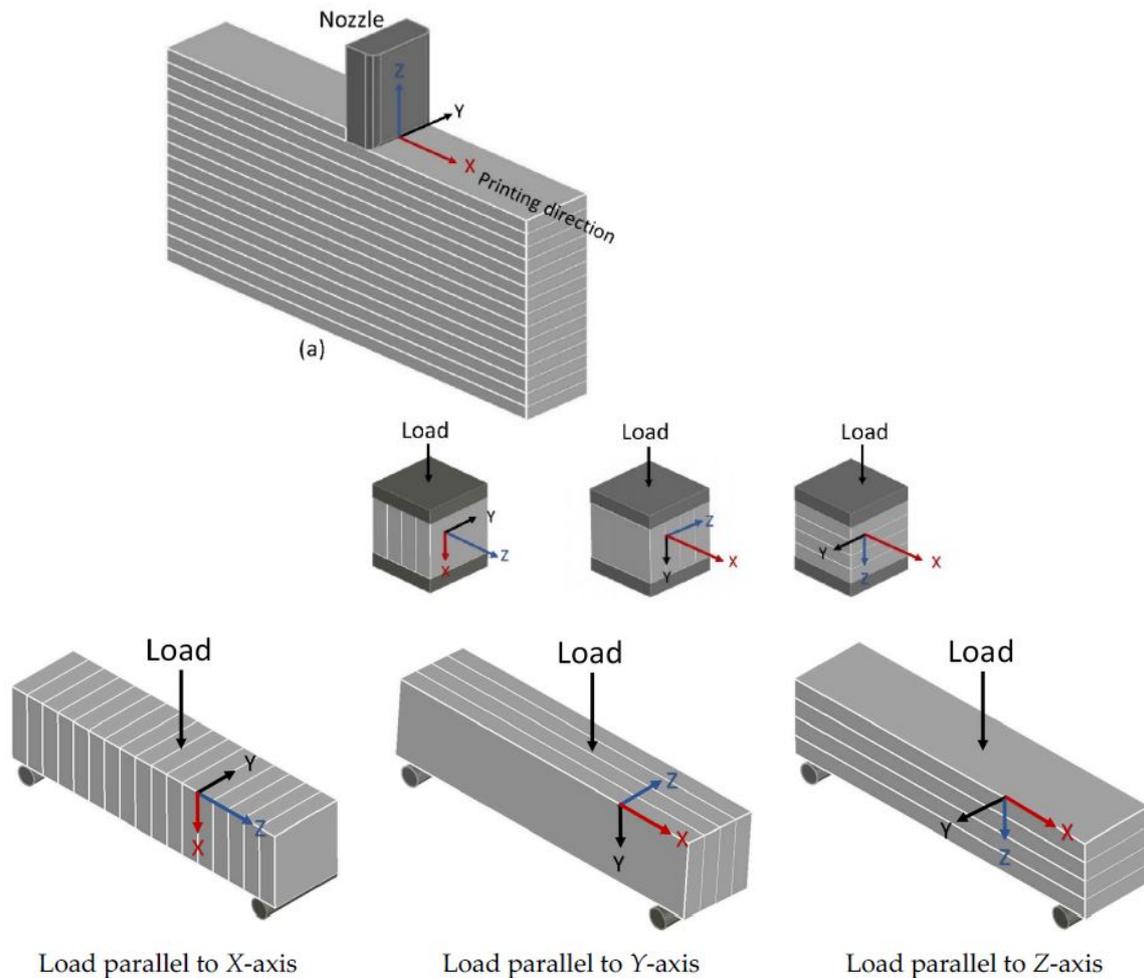


FIGURE 4.11 – Directions des forces appliquées par rapport au sens des couches [REHMAN et KIM 2021]

Les essais de compression et de flexion sont réalisés selon la norme NF EN 196-1. Pour chaque type d'échantillons, trois barrettes de forme prismatique et de taille $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ sont d'abord testées en flexion par trois points jusqu'à leur rupture. Ensuite, les six morceaux obtenus sont testés en compression. Lors de l'essai de compression, la force est exercée par l'appareil sur un carré de taille $4 \times 4 \text{ cm}^2$ de l'échantillon. Afin d'étudier l'évolution des résistances mécaniques au cours du temps, ces essais de flexion et de compression ont été réalisés après 2 jours, 7 jours, 28 jours, 56 jours et 90 jours. Dans chaque cas testé, la moyenne des 3 (en flexion), respectivement 6 (en compression) valeurs est prise. Pour les essais de compression, quelques valeurs aberrantes apparaissaient. Ces valeurs qui sont beaucoup trop faibles par rapport à la moyenne ne sont pas prises en compte puisqu'elles indiquent des défauts locaux dans les barrettes et ne sont par conséquent pas représentatives. L'ensemble des résultats obtenus lors des essais de flexion et de compression peuvent être trouvés dans les ANNEXES A.4 et A.5. Les essais ont été réalisés avec la machine INSTRON 5585. La vitesse de mise en charge est de 3 kN/min lors des essais de flexion et de 144 kN/min lors des essais de compression.



FIGURE 4.12 – Essai de flexion



FIGURE 4.13 – Essai de compression

Résultats

Résistance en compression

Les moyennes et écart-types des résistances obtenues en compression pour les quatre types d'échantillons aux différentes échéances sont représentés dans la TABLE 4.4. Les moyennes et écart-types obtenus sont également visibles à la FIGURE 4.14.

Type d'échantillons	2 jours	7 jours	28 jours	56 jours	90 jours
Moulés, sable naturel	$60,53 \pm 2,28$	$76,27 \pm 3,72$	$81,61 \pm 2,77$	$89,87 \pm 1,48$	$90,39 \pm 2,44$
Moulés, sable recyclé	$52,51 \pm 1,07$	$72,25 \pm 1,5$	$81,43 \pm 1,95$	$85,11 \pm 1,11$	$83,59 \pm 2$
Imprimés, sens de pose	$32,15 \pm 2,28$	$49,04 \pm 1,82$	$54,15 \pm 5,82$	$69,49 \pm 4,17$	/
Imprimés, sens perpendiculaire	$35,04 \pm 4,63$	$55,63 \pm 4,15$	$69,51 \pm 3,73$	$75,74 \pm 3,29$	/

TABLE 4.4 – Résistances en compression pour les différents types d'échantillons testés [MPa]

Sur base de la TABLE 4.4 et de la FIGURE 4.14, différentes observations peuvent être faites :

- Tout d'abord, quelle que soit la série testée, la résistance en compression augmente au cours du temps grâce à de la réaction d'hydratation qui progresse.
- En comparant les deux séries d'échantillons moulés, on peut voir que le mortier à base de sable naturel se comporte un peu mieux que le mortier à base de sable recyclé, comme cela a été prédit dans la revue de littérature. Cependant, la différence de résistance n'est pas très importante et à 28 jours, les deux mortiers ont quasi la même résistance en compression. La différence des résistances pour les deux séries moulées est la plus grande après 2 jours quand la résistance moyenne mesurée pour les échantillons à base de sable recyclé est 13,2% inférieure à celle mesurée pour les échantillons à base de sable naturel. Ensuite, lorsque le temps progresse, les résistances des deux séries s'approchent : à 7 jours, la résistance du mortier à base de sable recyclé est seulement 5,3% inférieure à celle du mortier à base de sable naturel, et à 28 jours, cette différence diminue encore et ne s'élève qu'à 0,22%. À 56 et 90 jours, la différence entre les deux séries redevient un peu plus

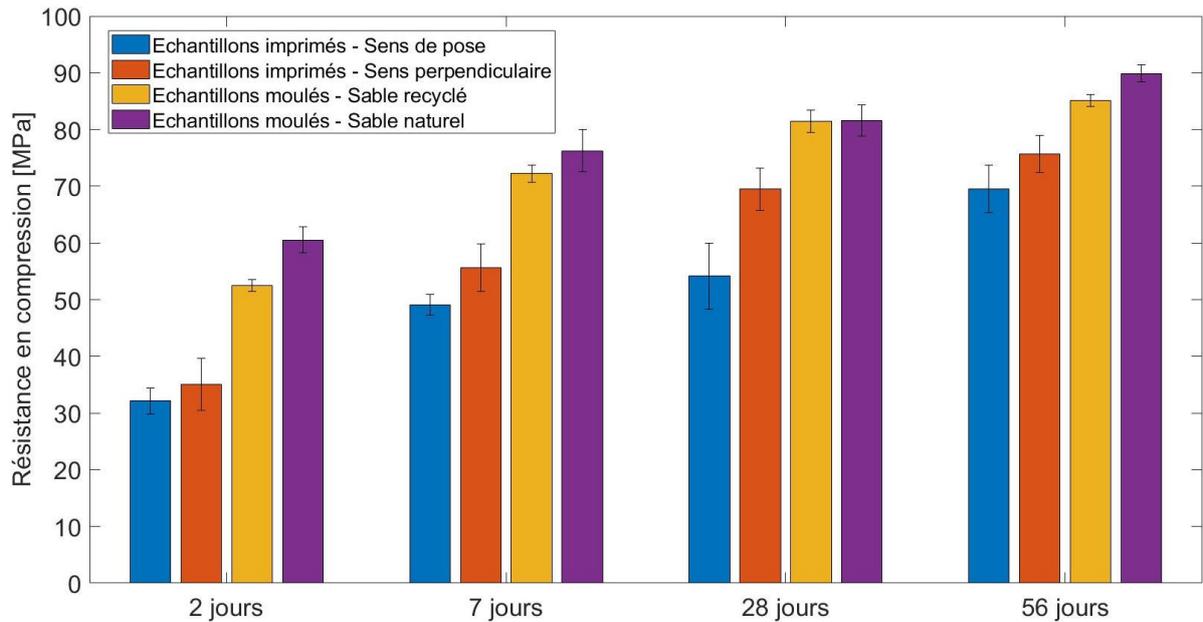


FIGURE 4.14 – Comparaison de la résistance en compression

remarquable, la résistance du mortier à base de sable recyclé étant inférieure de 5,3%, respectivement 7,5%, par rapport à celle du mortier à base de sable naturel. Cependant, toutes ces différences sont faibles par rapport à ce qui a été évoqué dans la revue de littérature.

Le mortier à base de sable recyclé gagne donc un peu plus tard en résistance, mais les performances finalement atteintes sont similaires. De plus, avec une résistance aux alentours de 80 MPa après 28 jours, les deux séries de mortier ont une résistance très élevée. Cette résistance élevée est due à la quantité importante de ciment dans le mélange. De plus, des adjuvants peuvent également être trouvés dans la composition. La quantité importante de ciment et les adjuvants sont nécessaires afin d'obtenir les propriétés indispensables pour l'impression et ont comme effet d'améliorer la résistance en compression du mortier. En plus, ces deux facteurs semblent être la raison pour laquelle les effets potentiellement négatifs du sable recyclé ne sont pas fortement perceptibles pour la résistance en compression.

- En comparant les résistances en compression des échantillons moulés avec ceux des échantillons imprimés, on peut clairement constater que le processus de fabrication par impression 3D a comme effet de diminuer les résistances atteintes. À 28 jours, la résistance moyenne atteinte pour les échantillons imprimés et testés dans le sens de pose est inférieure de 33,5% par rapport à celle atteinte pour les échantillons moulés avec sable recyclé. Si les échantillons sont testés dans le sens perpendiculaire au sens de pose, cette différence est de 14,6 %. L'explication de la différence des résistances en compression entre les échantillons moulés et imprimés se trouve très probablement dans les conditions de cure. En effet, les échantillons moulés sont directement passés dans la chambre humide après leur fabrication, et une fois démoulés, ils sont immergés dans l'eau. Par contre, les échantillons imprimés restent au site d'impression pendant les premières heures et sont ensuite transportés au laboratoire de l'Université de Liège. Par conséquent, ils passent environ 48 heures dans des conditions ambiantes avant d'être déposés dans la chambre humide. Ces conditions ne sont pas optimales comme conditions de cure. De plus, aucun

coffrage qui pourrait protéger le mortier de l'environnement extérieur lors de sa cure n'est présent dans le cas des échantillons imprimés. La surface exposée à l'air ambiant pendant les premières 24 heures après la fabrication est donc beaucoup plus importante dans le cas des échantillons imprimés que dans le cas des échantillons moulés.

MUY et al. [Yeakleang MUY, HUBERT, COURARD et al. 2023] ont montré que les conditions de cure ont une influence importante sur les résistances en compression atteintes. Pour cela, ils ont comparé les résistances de deux mortiers moulés avec la même composition mais qui ont subi des conditions de cure différentes. La composition du mortier est celle développé dans le cadre du projet CIRMAP, c'est-à-dire celle qui est également étudiée dans ce travail de fin d'études. Le premier mortier testé a durci dans un environnement à 20°C et avec une humidité relative de $95\% \pm 5\%$, alors que le deuxième mortier testé a durci dans un environnement à 20°C et avec une humidité relative de $60\% \pm 5\%$. Les résistances obtenues en compression sont présentées à la FIGURE 4.15 suivante :

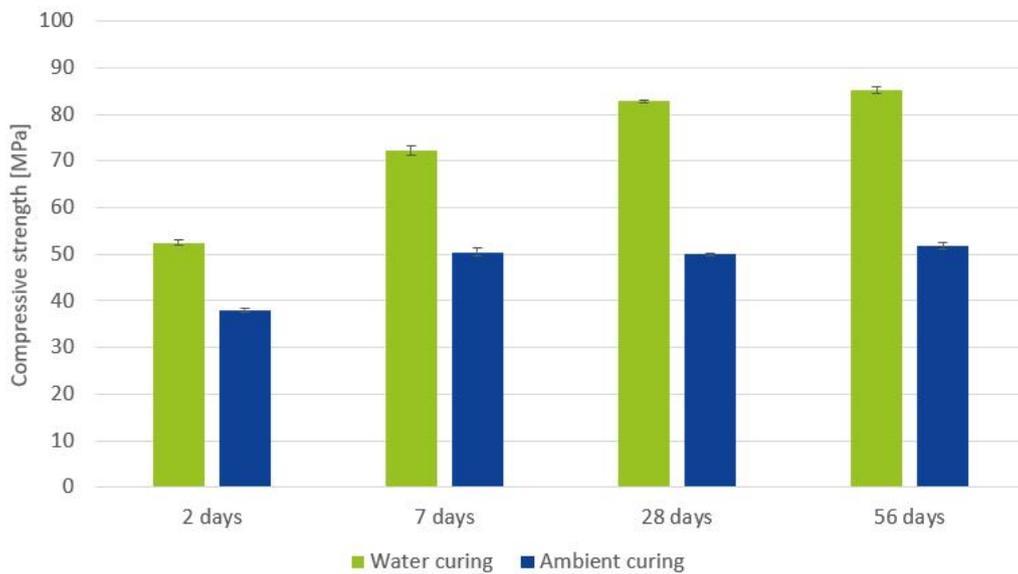


FIGURE 4.15 – Influence des conditions de cure sur la résistance en compression [Yeakleang MUY, HUBERT, COURARD et al. 2023]

Cette FIGURE 4.15 montre clairement l'influence très significative des conditions de cure. La résistance en compression des mortiers dont la cure a eu lieu à une humidité relative de $95\% \pm 5\%$ est beaucoup plus élevée que celle des mortiers dont la cure a eu lieu à une humidité relative de $60\% \pm 5\%$. Les conditions de cure des échantillons imprimés étaient donc beaucoup moins favorables que celles des échantillons moulés ce qui explique la différence en termes de résistance en compression qui a été observée.

- En comparant les résistances en compression des échantillons imprimés testés dans le sens de pose à celles des échantillons imprimés testés dans le sens perpendiculaire, on peut constater que les résistances des échantillons testés dans le sens perpendiculaire sont toujours plus élevées, quel que soit le nombre de jours. En regard des résultats des essais de cisaillement et de traction directe pour tester l'adhérence, on aurait pu s'attendre à des échantillons isotropes, avec une résistance en compression qui ne diffère pas en fonction du sens testé. Afin de détecter si cette différence est significative ou simplement due à la dispersion des résultats, une analyse basée sur la loi du t de Student-Fisher

a été réalisée. En effet, vu que seulement 6 échantillons ont été testés en compression, la différence observée pourrait être attribuée au hasard. L'analyse basée sur la loi du t de Student-Fisher a été réalisée pour avoir un intervalle de signification de 95% et a montré qu'il existe effectivement une différence considérable. Selon cette analyse, à 2 jours, la différence observée entre les échantillons testés dans le sens de pose et ceux testés dans le sens perpendiculaire à la pose peut encore être attribuée à la dispersion des résultats. Par contre, à 7 jours, 28 jours et 56 jours, l'analyse de Student-Fisher a montré que la différence est trop significative pour être attribuée au hasard. Les échantillons imprimés sont donc effectivement plus résistants en compression lorsqu'ils sont testés dans le sens perpendiculaire à la pose que lorsqu'ils sont testés dans le sens de pose. Cela est cohérent avec les résultats de REHMAN et al. [REHMAN et KIM 2021] qui ont été présentés dans la revue de littérature. En effet, ces auteurs ont comparé de nombreuses études et mentionnent que dans la plupart de ces études, les échantillons imprimés présentent une résistance en compression plus faible lorsqu'ils sont testés dans le sens de pose (c'est-à-dire sous une charge parallèle à l'axe qu'ils définissent comme axe Z) que lorsqu'ils sont testés dans le sens perpendiculaire à la pose (c'est-à-dire sous une charge parallèle à l'axe qu'ils définissent comme axe Y).

- Finalement, il faut encore remarquer que même si leur résistance en compression est inférieure à celle des échantillons moulés, les échantillons imprimés atteignent une résistance en compression aux alentours de 70 MPa après 56 jours, quel que soit le sens dans lequel ils sont testés. Il s'agit toujours d'une résistance très élevée, et l'utilisation de sable recyclé ainsi que la fabrication par impression 3D ne posent par conséquent pas de problème en termes de résistance en compression pour les pièces finales.

Résistance en flexion

Les résistances moyennes obtenues en flexion pour les quatre types d'échantillons aux différentes échéances sont représentées dans la TABLE 4.5. De plus, les moyennes et écart-types obtenus sont visualisés à la FIGURE 4.16.

Type d'échantillons	2 jours	7 jours	28 jours	56 jours	90 jours
Moulés, sable naturel	12,21 ± 1,14	9,46 ± 0,62	12,51 ± 0,49	13,17 ± 0,4	10,78 ± 0,56
Moulés, sable recyclé	7,61 ± 0,5	10,52 ± 1,05	9,46 ± 0,37	10,51 ± 0,83	10,50 ± 0,6
Imprimés, sens de pose	6,45 ± 1,19	11,20 ± 0,84	13,47 ± 0,46	13,65 ± 0,96	/
Imprimés, sens perpendiculaire	7,04 ± 0,32	11,42 ± 1,55	13,82 ± 0,67	11,93 ± 0,98	/

TABLE 4.5 – Résistances en flexion pour les différents types d'échantillons testés [MPa]

Sur base de la TABLE 4.5 et la FIGURE 4.16, différentes observations peuvent être faites :

- Les échantillons imprimés ainsi que les échantillons moulés avec le mortier à base de sable naturel atteignent des résistances similaires en flexion, sauf à 2 jours. Une analyse basée sur la loi du t de Student-Fisher a montré que les différences observées entre ces trois séries d'échantillons à 28 jours et à 56 jours peuvent être attribuées à la dispersion des résultats. À 28 jours et à 56 jours, les échantillons imprimés avec le mortier à base de sable recyclé montrent donc des résultats aussi bons en flexion que les échantillons moulés avec le mortier à base de sable naturel, quel que soit le sens dans lequel ils sont testés.
- À 2 jours, la résistance en flexion du mortier à base de sable naturel est clairement plus élevée que celle du mortier à base de sable recyclé (moulé ou imprimé). En regard des

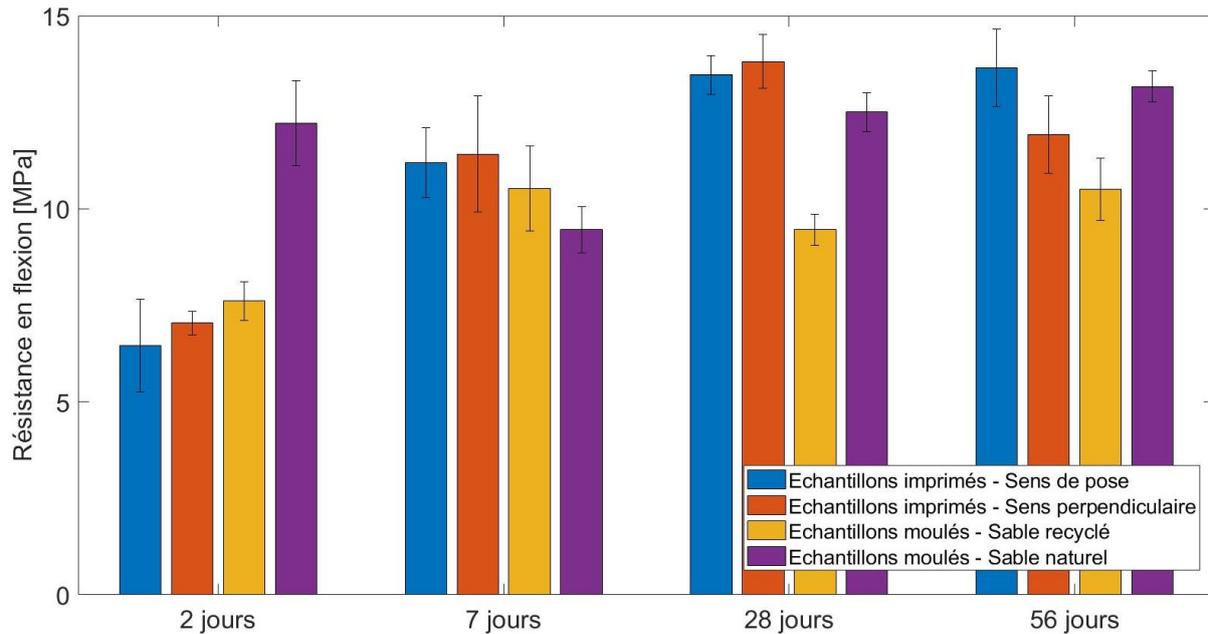


FIGURE 4.16 – Comparaison de la résistance en flexion

résultats obtenus à 7 jours, 28 jours et 56 jours, cette valeur fort élevée à 2 jours semble aberrante. Il ne faut donc pas accorder trop d'attention à ce résultat anormal à 2 jours.

- Entre 7 jours, 28 jours et 56 jours, la résistance en flexion reste relativement constante, avec une valeur entre 10 MPa et 15 MPa pour les quatre séries testées. Il faut remarquer que l'essai de flexion par trois points est très sensible à des défauts locaux, beaucoup plus sensible que par exemple l'essai de compression. Cela est dû au fait que la section dans laquelle la rupture aura lieu est choisie lors de l'essai de flexion par trois points. Par conséquent, plus de variations dans les résultats sont perceptibles et des tendances d'évolution de la résistance sont plus difficiles à détecter par des essais de flexion par trois points. Il est donc conseillé de se concentrer plutôt sur les résultats obtenus en compression.

- En comparant la résistance en flexion des échantillons imprimés, on ne peut pas clairement voir de différence entre les deux sens testés. L'anisotropie n'est donc observable que sur la résistance en compression mais pas sur la résistance en flexion. Cela s'explique lorsqu'on observe le comportement des échantillons imprimés sous les différentes sollicitations : lorsque les échantillons sont testés en compression dans leur sens de pose, la sollicitation a comme effet de presser les couches l'une contre l'autre. Par contre, lorsqu'ils sont testés en compression dans le sens perpendiculaire à leur pose, les différentes couches ont tendance de s'écarter sous la sollicitation. En flexion, les couches n'ont pas de tendance à s'écarter pour aucun des deux sens testés. En effet, pour tester l'écartement des couches en flexion, on aurait dû tester les échantillons dans le troisième sens qui est indiqué à la FIGURE 4.11, c'est-à-dire sous une charge parallèle à l'axe défini comme axe X sur cette FIGURE 4.11. Il pourrait être intéressant de tester également des échantillons en flexion dans cette troisième direction afin de détecter une éventuelle anisotropie. En effet, dans la revue de littérature, il a été mentionné par REHMAN et al. [REHMAN et KIM 2021] que c'est dans cette troisième direction possible dans laquelle la résistance en flexion est la plus faible.

- Finalement, la même conclusion peut être tirée en flexion qu'en compression : les échantillons testés ont tous de bonnes résistances en flexion, et l'utilisation de sable recyclé ainsi que la fabrication par impression 3D ne posent par conséquent pas de problème en termes de résistance en flexion pour les pièces finales.

4.4 Porosité, masse volumique réelle et masse volumique apparente

Méthode

La porosité ouverte, c'est-à-dire la porosité accessible à l'eau, est évaluée selon la norme NF P18-459. La porosité est exprimée en %, elle donne le volume des pores par rapport au volume apparent.

Par échantillon, l'essai de porosité se fait au moins sur trois éprouvettes qui ont été conservées dans l'eau après leur démoulage. À nouveau, trois types d'échantillons sont comparés lors de l'essai : des échantillons moulés avec le mortier de référence à base de sable naturel, des échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé et des échantillons obtenus par découpage de pièces imprimées avec le mortier à base de sable recyclé.

Lorsque les échantillons ont atteint l'âge de l'essai, ils sont mis sous vide. Pour cela, ils sont placés dans un récipient connecté à un appareillage à vide qui fait diminuer la pression jusqu'à une pression inférieure ou égale à 25 mbar. Après 4 heures dans le récipient, l'eau est introduite jusqu'à ce que les échantillons sont complètement couverts d'eau (FIGURE 4.17). Les échantillons restent ensuite dans le récipient à pression réduite pendant 44 heures [NF P18-459].



FIGURE 4.17 – Récipient connecté à l'appareillage à vide



FIGURE 4.18 – Échantillons dans l'étuve

Après 44 heures, les échantillons sont repris du récipient et leur masse dans l'eau et dans l'air est mesurée. Pour mesurer la masse dans l'eau, l'échantillon doit être complètement

immergé et est ensuite pesé grâce à un système de suspension de la balance hydrostatique. Ensuite, les échantillons sont placés dans l'étuve à 60°C et séchés jusqu'à l'obtention d'une masse constante qui est la masse sèche [NF P18-459]. Dans la norme NF P18-459, il est indiqué qu'ils sont séchés dans une étuve à 105°C, mais vu que des mortiers et non des bétons sont testés dans le cadre de ce travail, une étuve à 60°C est utilisée (FIGURE 4.18). La masse est considérée comme constante lorsqu'elle ne diffère pas de plus de 0,05% lors de deux pesées successives qui sont réalisées avec 24 heures d'écart [NF P18-459].

La porosité accessible à l'eau n , exprimée en %, peut alors être évaluée à partir de la masse dans l'eau, la masse dans l'air et la masse sèche selon la formule suivante [NF P18-459] :

$$n = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

À partir de la porosité n et du volume apparent V_t qui est simplement obtenu par multiplication des dimensions de l'échantillon, il est possible d'obtenir le volume solide V_s :

$$n = \frac{V_{vides}}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t} \Rightarrow V_s = V_t - n \cdot V_t = V_t \cdot (1 - n) \quad (4.2)$$

Connaissant le volume solide V_s , la masse volumique réelle ρ_{reel} qui sera exprimée en [kg/m³] peut être évaluée :

$$\rho_{reel} = \frac{M_{sec}}{V_s} \quad (4.3)$$

À partir de la masse sèche ainsi que des dimensions des échantillons, il est également possible de déterminer leur masse volumique apparente ρ_{app} , exprimée en [kg/m³] :

$$\rho_{app} = \frac{M_{sec}}{V_t} \quad (4.4)$$

Cette masse volumique apparente peut être utilisée afin de vérifier les résultats obtenus pour la porosité, comme ces deux propriétés sont fortement liées entre elles. En effet, plus un échantillon est poreux, plus sa masse volumique apparente est faible. Il faut donc que les résultats obtenus pour la porosité correspondent aux résultats obtenus pour la masse volumique apparente.

Résultats

Les résultats obtenus pour la porosité accessible à l'eau pour les trois séries d'échantillons testées sont montrés dans la TABLE 4.6 et à la FIGURE 4.19. Ces valeurs indiquées correspondent aux moyennes et écart-types pour l'ensemble des échantillons testés à une échéance. L'ensemble des résultats obtenus peut être trouvé dans l'ANNEXE A.6.

Type d'échantillons	2 jours	7 jours	28 jours	56 jours	91 jours
Moulés, sable naturel	19,37 ± 0,04	18,68 ± 0,23	17,86 ± 0,16	17,71 ± 0,07	17,65 ± 0,13
Moulés, sable recyclé	21,07 ± 0,12	20,25 ± 0,07	20,39 ± 0,11	20,68 ± 0,03	20,00 ± 0,15
Imprimés, sable recyclé	/	18,82 ± 0,21	18,25 ± 0,16	18,21 ± 0,15	17,35 ± 0,06

TABLE 4.6 – Porosité pour les différents types d'échantillons testés [%]

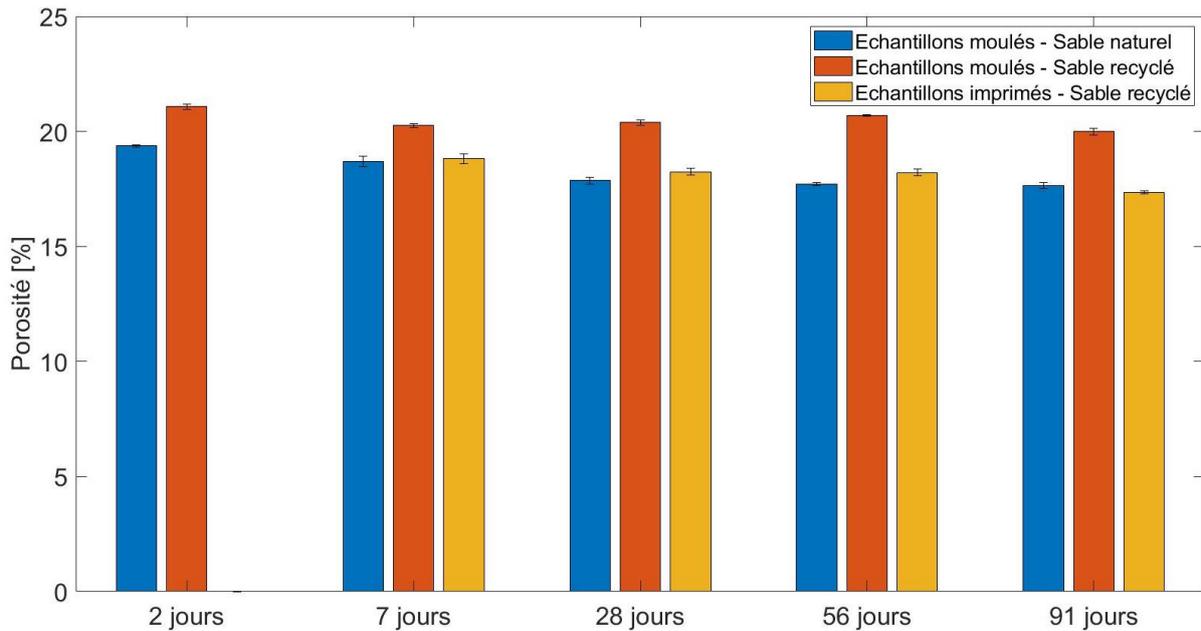


FIGURE 4.19 – Comparaison de la porosité

Les observations suivantes peuvent être faites sur base de la TABLE 4.6 et la FIGURE 4.19 :

- Pour les échantillons moulés à base de sable naturel ainsi que pour les échantillons imprimés, la porosité diminue au cours du temps. Cela peut être expliqué par la réaction d’hydratation du ciment qui progresse. Pour les échantillons moulés à base de sable recyclé, globalement, cette tendance est également visible. Entre 7 jours et 56 jours, on peut voir que la porosité ré-augmente légèrement. Cependant, cette augmentation est probablement juste due à la dispersion des résultats ou à des valeurs légèrement aberrantes.
- En comparant les valeurs de porosité obtenues pour les échantillons moulés avec sable recyclé (en rouge) et avec sable naturel (en bleu), il est clairement visible que les échantillons moulés à base de sable recyclé sont plus poreux. Cette différence est causée par l’utilisation du sable recyclé. En effet, comme décrit dans la revue de littérature, les granulats recyclés ont une densité plus faible et sont plus poreux que les granulats naturels. Le sable recyclé utilisé dans le cadre de ce travail est obtenu à partir de déchets de béton ce qui signifie qu’on retrouve de l’ancienne pâte de ciment sur les granulats. Cette pâte de ciment a une porosité considérable alors que le granulat en soi a une porosité quasi nulle. La présence de l’ancienne pâte de ciment sur les granulats du sable recyclé et non sur les granulats du sable naturel est donc à l’origine de la différence de porosité observée à la FIGURE 4.19. De plus, pour des raisons d’imprimabilité, uniquement la fraction 0/2 mm du sable est utilisée, et la quantité d’ancienne pâte de ciment est la plus importante sur cette fraction la plus fine du sable recyclé.
- Une différence de porosité est également visible entre les échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé (en rouge) et les échantillons imprimés avec le mortier à base de sable recyclé (en jaune). Le mode de fabrication par impression 3D semble diminuer la porosité par rapport à une fabrication classique. Les échantillons moulés sont compactés avec une table à secousses alors que les échantillons imprimés sont compactés lors de l’impression par la tête d’imprimante qui pousse légèrement sur la couche imprimée,

ainsi que par le poids des couches supérieures. Ces deux méthodes de mise en oeuvre ne semblent pas créer le même réseau capillaire. Il faut noter que l'essai de porosité détecte uniquement la porosité ouverte accessible à l'eau. Afin d'estimer la porosité totale qui inclut la porosité fermée, il est intéressant d'analyser également les résultats obtenus pour la masse volumique apparente ce qui sera fait dans la suite.

- Globalement, la porosité ouverte est aux alentours de 17% - 18% pour les échantillons moulés à base de sable naturel et pour les échantillons imprimés à base de sable recyclé. Pour les échantillons moulés à base de sable recyclé, elle est plus importante, à savoir 20% - 21 %. De manière générale, une porosité plus faible est avantageuse en termes de résistances mécaniques et de durabilité. En effet, si un échantillon est moins poreux, il y a plus de matière qui peut résister aux sollicitations. De plus, les échantillons moins poreux absorbent en général moins d'eau ce qui est favorable en ce qui concerne les problèmes de durabilité qui sont liés à l'absorption d'eau.

Les masses volumiques apparentes calculées à partir de la masse sèche et des dimensions des échantillons sont données dans la TABLE 4.7 et à la FIGURE 4.20. Ces valeurs indiquées correspondent aux moyennes et écart-types pour l'ensemble des échantillons testés à une échéance. L'ensemble des résultats obtenus peut être trouvé dans l'ANNEXE A.6.

Type d'échantillons	2 jours	7 jours	28 jours	56 jours	91 jours
Moulés, sable naturel	2058 ± 20	2077 ± 14	2073 ± 3	2093 ± 7	2086 ± 7
Moulés, sable recyclé	1970 ± 13	1978 ± 17	1993 ± 14	1986 ± 28	1995 ± 34
Imprimés, sable recyclé	/	2002 ± 17	1990 ± 27	1987 ± 10	2002 ± 14

TABLE 4.7 – Masse volumique apparente pour les différents types d'échantillons testés [kg/m³]

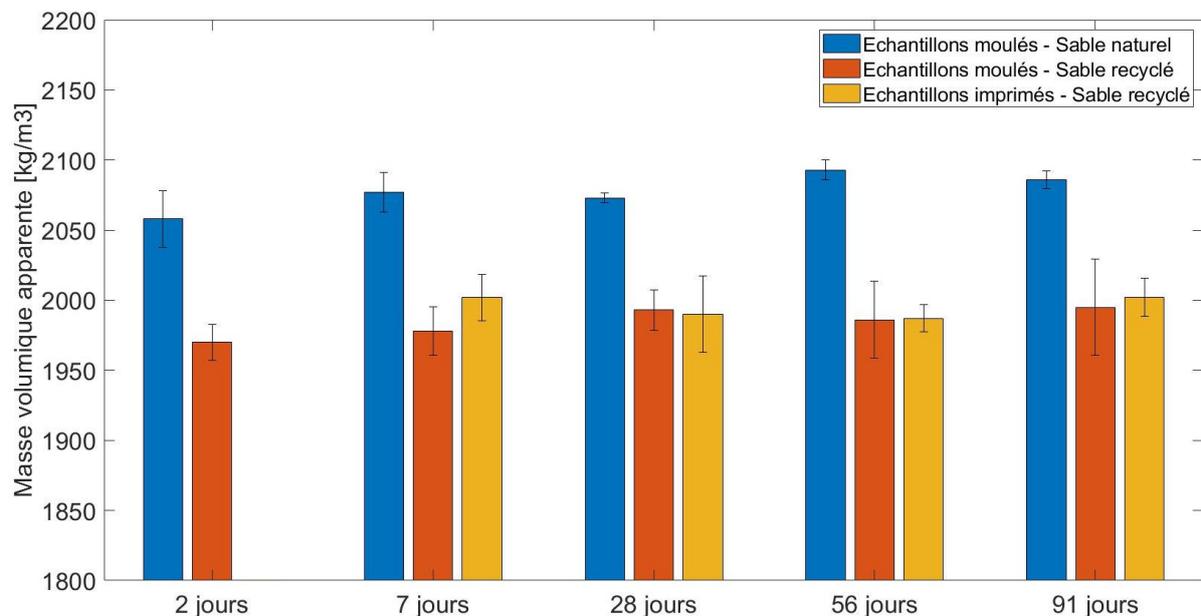


FIGURE 4.20 – Comparaison de la masse volumique apparente

Afin d'obtenir des informations sur la porosité fermée, il est intéressant de comparer les masses volumiques apparentes obtenues (FIGURE 4.20) avec les porosités ouvertes

(FIGURE 4.19). Les échantillons moulés avec le mortier à base de sable naturel (en bleu) ont la masse volumique apparente la plus importante. Une masse volumique apparente plus élevée est corrélée à une porosité plus faible ce qui est bien le cas pour les échantillons moulés avec le mortier à base de sable naturel à la FIGURE 4.19.

Par contre, les échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé (en rouge) et les échantillons imprimés avec le mortier à base de sable recyclé (en jaune) ont des masses volumiques apparentes quasi identiques (FIGURE 4.20) alors que la porosité ouverte était considérablement plus importante pour les échantillons moulés (FIGURE 4.19). Deux explications potentielles pour cette différence sont les suivantes :

- Les échantillons imprimés ont une porosité fermée plus importante que les échantillons moulés. La porosité totale (ouverte et fermée) des deux séries est similaire ce qui explique leurs masses volumiques apparentes quasi identiques alors que la porosité ouverte qui est mesurée lors de l'essai est plus importante dans le cas des échantillons moulés. Les modes de fabrication différents créent donc des réseaux capillaires différents, avec une porosité plus fermée dans le cas des échantillons imprimés. Afin de vérifier cette hypothèse, il serait intéressant de tester également des échantillons imprimés avec le mortier à base de sable naturel et de voir si la même observation peut être faite en les comparant aux échantillons moulés avec le mortier à base de sable naturel.

- Une deuxième possibilité est que le réseau capillaire créé lors de la fabrication par impression 3D est aussi ouvert, mais plus fin et plus tortueux comparé à celui créé lors de la fabrication classique. Il est alors possible que cette porosité plus fine et plus tortueuse n'est pas complètement détectée lors de l'essai de porosité, bien qu'elle soit ouverte. La cure des échantillons a eu lieu dans l'eau et les échantillons sont saturés d'eau quand l'essai de porosité commence. Ensuite, lorsque les échantillons sont placés dans le récipient connecté à l'appareillage sous vide, l'eau contenue dans les échantillons sort à cause de la diminution de pression jusqu'à 25 mbar. Une dépression se crée dans le réseau capillaire. Par conséquent, lorsque l'eau est ensuite introduite dans le récipient, elle rentrera dans tout le réseau capillaire et remplira la porosité ouverte.

Cependant, si le réseau capillaire est plus fin et plus tortueux, comme c'est éventuellement le cas pour les échantillons imprimés, l'eau sort plus difficilement lors de la mise sous vide et prend plus de temps pour sortir. Il est alors possible que le temps dont l'eau a besoin pour sortir est plus important que le temps pendant lequel les échantillons sont mis sous vide et que, par conséquent, l'eau ne s'écoule pas correctement. L'eau qui se trouve encore dans le réseau capillaire forme dans ce cas des bouchons, et l'air se trouvant derrière ces bouchons d'eau ne sait pas sortir. Lorsque l'eau introduite par la suite arrive au bouchon d'eau avec l'air enfermée derrière, celle-ci a tendance à comprimer l'air pour aller plus loin. Cependant, à un certain moment, la pression de l'air enfermée devient plus importante que la tension capillaire, et par conséquence l'eau ne sait pas entrer plus loin. L'intérêt de la mise sous vide est de dégager l'air se trouvant dans les capillaires afin d'éviter ce type de problème. Cependant, comme décrit, dans le cas où la porosité ouverte des échantillons imprimés est plus fine et plus tortueuse, il est possible que l'essai de porosité sous vide ne fonctionne pas correctement, et que par conséquent, toute la porosité ouverte ne soit pas détectée.

Afin de tester s'il existe réellement des problèmes liés à la procédure d'essai dans le cas des échantillons imprimés, il serait intéressant de refaire l'essai de porosité sous vide, mais sur

des échantillons qui étaient séchés auparavant. En effet, lorsque les échantillons ne sont pas saturés, des problèmes liés à de l'air enfermée derrière des bouchons d'eau sont évités.

Les masses volumiques réelles calculées à partir de la porosité pour les trois séries d'échantillons testées sont données dans la TABLE 4.8 et à la FIGURE 4.21. Ces valeurs indiquées correspondent aux moyennes et écart-types pour l'ensemble des échantillons testés à une échéance. L'ensemble des résultats obtenus peut être trouvé dans l'ANNEXE A.6.

Type d'échantillons	2 jours	7 jours	28 jours	56 jours	90 jours
Moulés, sable naturel	2553 ± 24	2554 ± 11	2524 ± 2	2543 ± 6	2533 ± 9
Moulés, sable recyclé	2496 ± 19	2480 ± 21	2504 ± 16	2504 ± 35	2493 ± 40
Imprimés, sable recyclé	/	2466 ± 15	2435 ± 37	2429 ± 16	2422 ± 18

TABLE 4.8 – Masse volumique réelle pour les différents types d'échantillons testés [kg/m³]

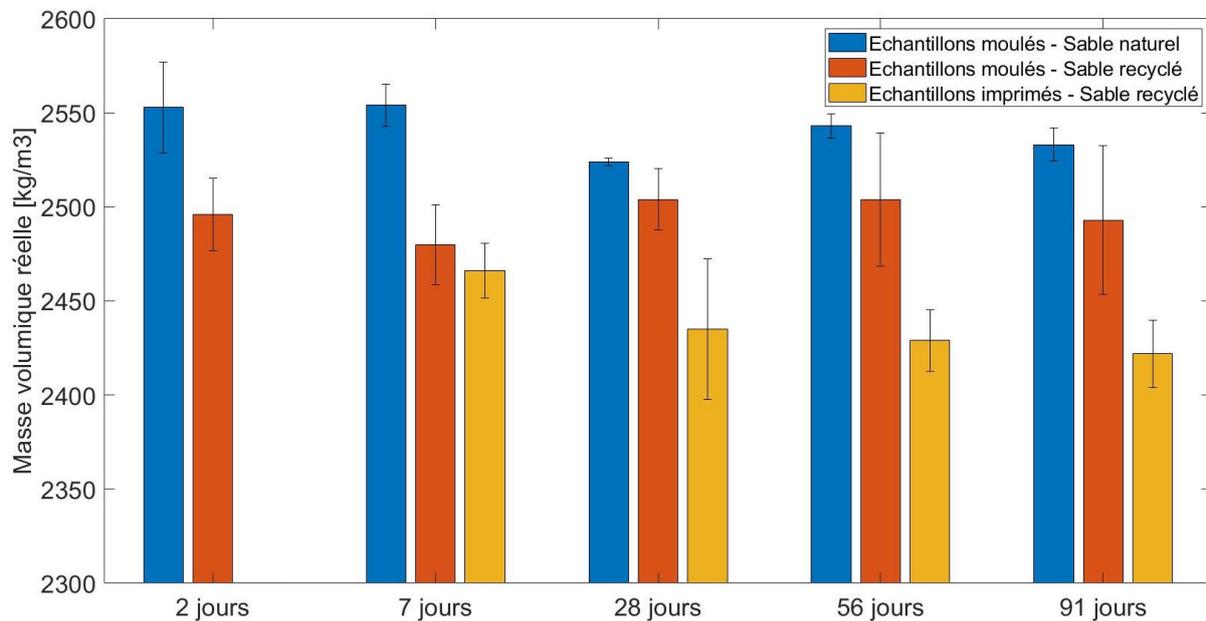


FIGURE 4.21 – Comparaison de la masse volumique réelle

En comparant les masses volumiques réelles obtenues avec les masses volumiques apparentes, on observe que les échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé et les échantillons imprimés ont des masses volumiques apparentes quasi identiques alors que leurs masses volumiques réelles diffèrent considérablement. Les échantillons testés lors de l'essai de porosité ont tous approximativement la même taille, et par conséquent des volumes totales similaires. Lorsque leurs masses apparentes sont similaires, cela signifie que leurs masses sèches le sont également. Les différences observées pour les masses volumiques réelles sont donc dues à des différences de volume solide. Les volumes solides sont obtenus à partir de la porosité. Lorsque l'essai de porosité sous-estime la porosité des échantillons imprimés, il surestime leur volume solide. Par conséquent, leur masse volumique réelle est également sous-estimée.

En conclusion, les résultats montrent que l'utilisation du sable recyclé augmente la porosité ouverte alors que le mode de fabrication par impression 3D la diminue. En effet, la fabrication par impression 3D semble créer un réseau capillaire différent par rapport à

celui créé la fabrication classique. La porosité totale des échantillons moulés et imprimés est d'un ordre de grandeur similaire, mais la porosité des échantillons imprimés est soit plus fermée, soit plus tortueuse et fine que celle des échantillons moulés.

4.5 Absorption d'eau

Méthode

Une autre propriété intéressante à étudier afin de comparer la performance des trois séries d'échantillons est l'absorption d'eau. L'absorption d'eau par capillarité est testée selon la norme NF EN 13057. Lors de cet essai, une surface des échantillons est placée dans l'eau et l'augmentation du poids à cause de l'absorption d'eau par capillarité est mesurée après différents intervalles de temps. La procédure d'essai peut être appliquée sur des bétons et des mortiers [NF EN 13057].

Après le démoulage, les échantillons à tester sont stockés dans l'eau jusqu'à l'âge de 28 jours. Ensuite, ils sont séchés dans l'étuve à $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 7 jours consécutifs, avant de commencer l'essai d'absorption. Avant de démarrer l'essai d'absorption, la masse initiale ainsi que les dimensions des échantillons sont notées. Ensuite, les échantillons sont placés dans un récipient contenant de l'eau déminéralisée. La hauteur d'eau doit être telle que la profondeur d'immersion des échantillons est de $2 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Des mesures du poids des échantillons sont prises après différents intervalles de temps, par exemple après 12 minutes, 30 minutes, 1 heure, 2 heures, 4 heures, 1 jour, 2 jours, 4 jours et 7 jours. Il est alors possible de déterminer l'absorption d'eau par capillarité par unité de surface en kg/m^2 après ces différents intervalles de temps [NF EN 13057].



FIGURE 4.22 – Essai d'absorption par capillarité sur les différentes faces des échantillons



FIGURE 4.23 – Essai d'absorption par capillarité avec de la peinture sur les surfaces non testées

Comme pour les autres essais, les trois séries d'échantillons sont testés : des échantillons moulés à base de sable recyclé, des échantillons moulés à base de sable naturel et des

échantillons imprimés à base de sable recyclé. Les échantillons testés sont à nouveau des barrettes de taille $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Pour chacune des séries d'échantillons, il est testé s'il y a une différence en fonction de la surface par laquelle l'absorption d'eau par capillarité a lieu. Pour les séries des échantillons moulés, 9 échantillons sont testés : 3 pour l'absorption par la surface du bas (*bottom absorption BA*), 3 pour l'absorption par la surface latérale (*lateral absorption LA*) et 3 pour l'absorption par la surface verticale (*vertical absorption VA*). L'ensemble des neuf échantillons testés pour une série d'échantillons moulés est visible à la FIGURE 4.22. Par "surface du bas", on entend la surface de taille $4 \times 16 \text{ cm}^2$ de l'échantillon qui est en contact avec le bas du moule pendant les premières 24 heures de cure de l'échantillon (colorée en rouge à la FIGURE 4.24). Par "surface latérale", on entend la surface de taille $4 \times 16 \text{ cm}^2$ de l'échantillon qui est en contact avec la surface latérale du moule pendant les premières 24 heures de cure de l'échantillon (colorée en bleu sur la FIGURE 4.24). Par "surface verticale", on entend la surface de taille plus petite de $4 \times 4 \text{ cm}^2$ qui sera en contact avec l'eau lorsque les échantillons sont posés à la verticale.

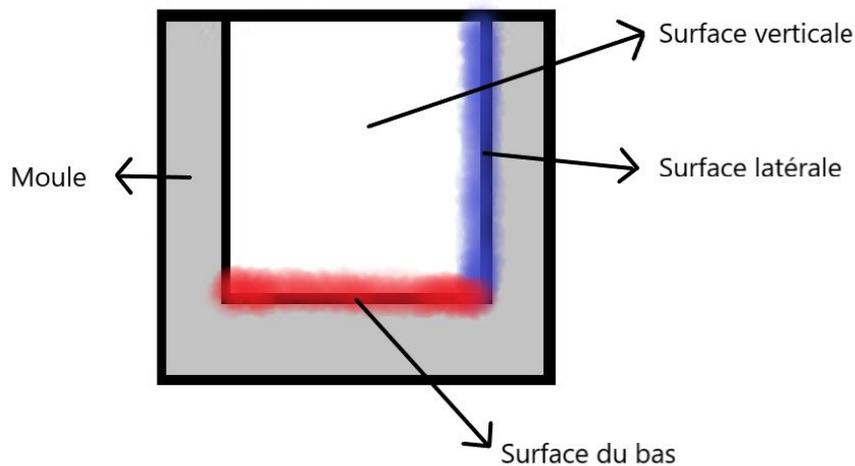


FIGURE 4.24 – Définition des différentes surfaces par lesquelles l'absorption d'eau sera testée pour les échantillons moulés

Pour la série avec les échantillons imprimés, l'absorption d'eau de 6 échantillons est testée, avec 3 échantillons qui sont placés dans l'eau dans le sens de pose des couches et 3 échantillons qui sont posés dans le sens perpendiculaire à la pose. Dans ce cas, la surface d'absorption a donc une aire de $4 \times 16 \text{ cm}^2$ pour les deux conditions testées.

Lors de l'analyse des résultats, il a été remarqué pour les échantillons moulés que l'absorption d'eau par la surface verticale est considérablement plus importante que par les surfaces latérales et du bas. Puisque les échantillons sont immergés de quelques millimètres dans l'eau, il est possible que cette différence vient simplement du fait que les quelques millimètres immergés des autres surfaces absorbent également de l'eau. Pour étudier si c'est réellement le cas, un essai d'absorption supplémentaire a été réalisé. Pour cet essai supplémentaire de la peinture a été appliquée sur les surfaces non testées afin de les rendre imperméables (FIGURE 4.23).

Résultats

L'ensemble des résultats obtenus lors des essais d'absorption d'eau peut être trouvé dans

l'ANNEXE A.7. La FIGURE 4.25 montre les résultats obtenus pour les échantillons moulés à base de sable recyclé, et pour les trois types de surfaces testées : absorption par la surface du bas (BA), par la surface latérale (LA) et par la surface verticale (VA). Pour chacune de ces conditions, la moyenne représentée à la FIGURE 4.25 est basée sur trois échantillons testés.

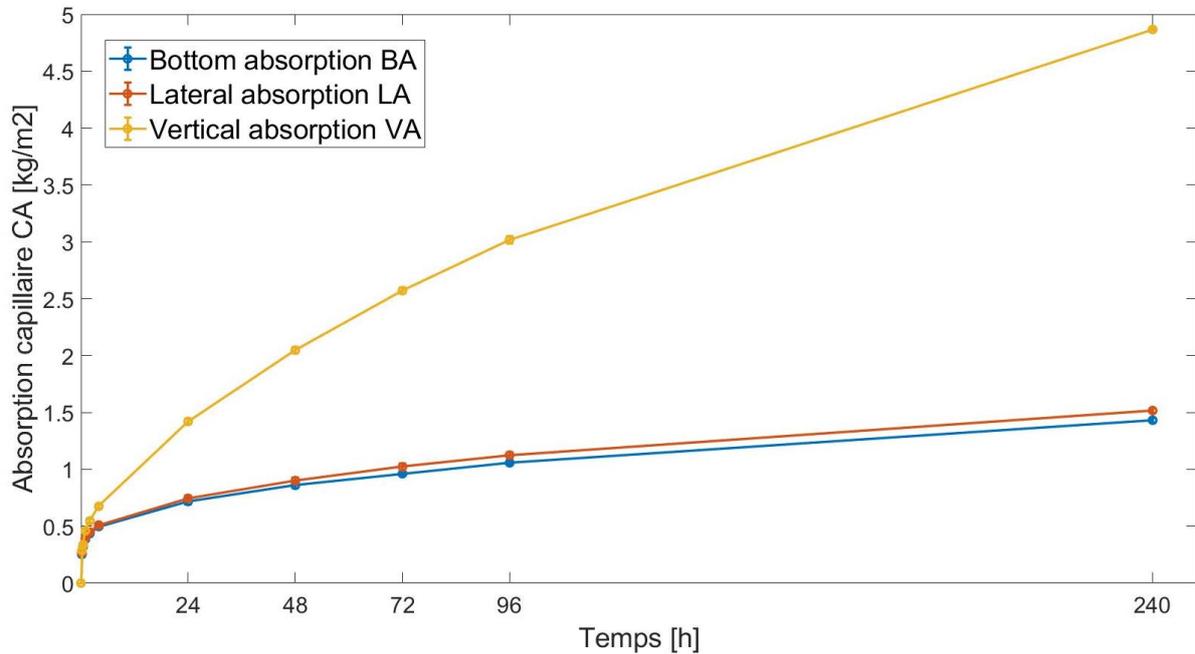


FIGURE 4.25 – Absorption d’eau par capillarité sur les différentes surfaces des échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé

L’absorption d’eau par la face du bas (en bleu) est très similaire à celle par la face latérale (en rouge), alors que celle par la face verticale (en jaune) est beaucoup plus importante. En effet, après une durée d’immersion de la surface de 24 heures, l’absorption d’eau par unité de surface est de 0,718 kg/m² pour la surface du bas et de 0,745 kg/m² pour la surface latérale. Par contre, pour la surface verticale, elle atteint le double, à savoir 1,421 kg/m².

La FIGURE 4.26 montre les résultats obtenus pour les échantillons moulés à base de sable naturel. À nouveau, la moyenne est basée sur trois échantillons pour chacune des conditions testées. Les observations qui peuvent être faites sont les mêmes que pour les échantillons moulés à base de sable recyclé à la figure précédente : l’absorption d’eau par la surface du bas (en bleu) et l’absorption d’eau par la surface latérale (en rouge) sont similaires alors que l’absorption d’eau par la surface verticale (en jaune) est beaucoup plus élevée. Après une durée de 24 heures, l’absorption par capillarité par unité de surface est de 0,725 kg/m² dans le cas de la surface du bas, de 0,649 kg/m² dans le cas de la surface latérale et de 1,385 kg/m² dans le cas de la surface verticale.

En comparant les résultats présentés sur les FIGURES 4.25 (sable recyclé) et 4.26 (sable naturel), on peut constater que l’absorption d’eau est quasi identique dans les deux cas. L’absorption d’eau par la surface du bas est un peu plus élevée dans le cas du mortier à base de sable naturel que dans le cas du mortier à base de sable recyclé. Par contre, l’absorption d’eau par la surface latérale et l’absorption d’eau par la surface verticale sont un peu plus élevées dans le cas du mortier à base de sable recyclé. Globalement, les

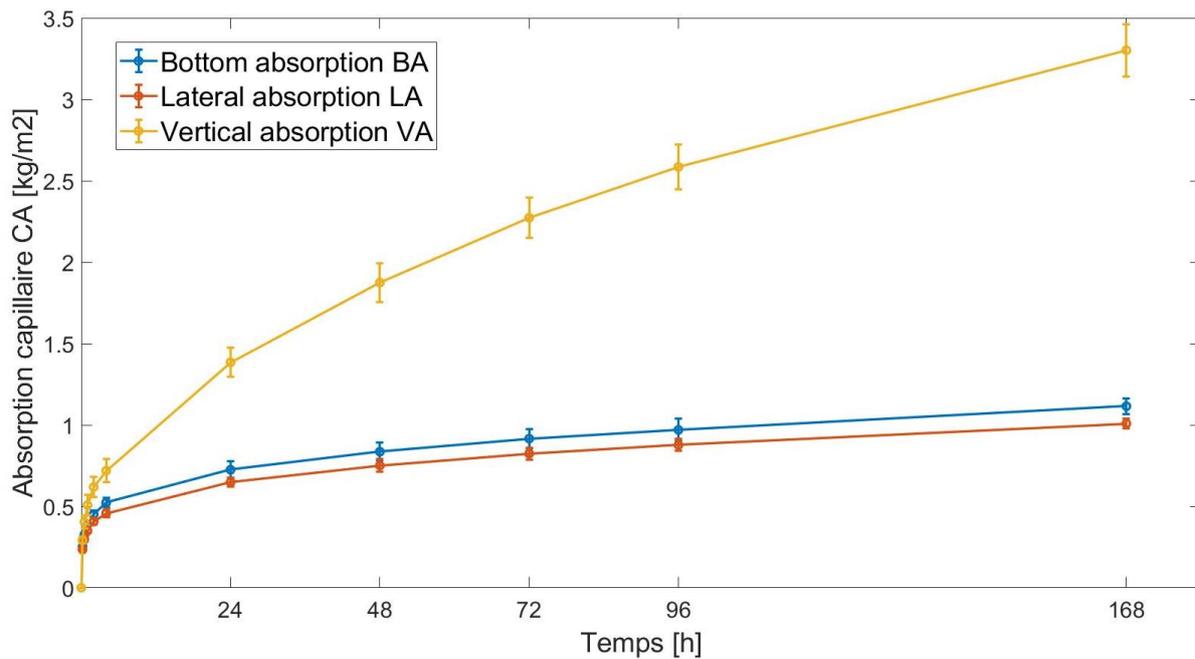


FIGURE 4.26 – Absorption d’eau par capillarité sur les différentes surfaces des échantillons moulés avec le mortier à base de sable naturel

résultats sont très similaires pour les deux mortiers et aucune différence significative n’est observée.

Il a été observé sur les FIGURES 4.25 et 4.26 qu’il n’y a pas de différence significative si l’absorption se fait par la surface du bas ou par la surface latérale. Par contre, l’absorption d’eau par unité de surface est beaucoup plus élevée si elle se fait par la surface verticale. Une explication possible pour cela est la profondeur d’immersion des échantillons. La hauteur d’eau dans le récipient est telle que la profondeur d’immersion des échantillons est de $2 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. L’absorption d’eau se fait donc non seulement par la surface testée, mais également par les quelques millimètres immergés des autres surfaces. Comme la surface verticale est plus petite que la surface du bas et les surfaces latérales, il est possible que dans ce cas l’absorption par les autres surfaces se fasse remarquer davantage. Afin de vérifier cette hypothèse, de la peinture a été appliquée sur les autres surfaces pour les rendre imperméables et un deuxième essai d’absorption a été réalisé sur des échantillons moulés à base de sable recyclé. Grâce à la peinture, il est assuré que l’absorption se fait uniquement par la surface testée lors de cet essai. Les résultats obtenus sont présentés à la FIGURE 4.27, qui compare les quantités absorbées dans les cas avec et sans peinture. Comme pour tous les autres essais, les moyennes sont à nouveau basées sur les résultats obtenus pour trois échantillons.

Cette FIGURE 4.27 montre que l’absorption d’eau par capillarité est plus petite dans le cas avec peinture, quelle que soit la surface testée. Cela est logique puisque la peinture élimine l’absorption par les quelques millimètres immergés des autres surfaces. La différence est de loin la plus remarquable dans le cas de l’absorption par la surface verticale. En effet, lorsque de la peinture est appliquée sur les autres surfaces, l’absorption d’eau par unité de surface tend vers des valeurs similaires pour la surface verticale que pour la surface du bas et les surfaces latérales. La différence montrée sur les FIGURES 4.25 et 4.26 était donc simplement due au fait que l’effet d’absorption d’eau des quelques millimètres immergés

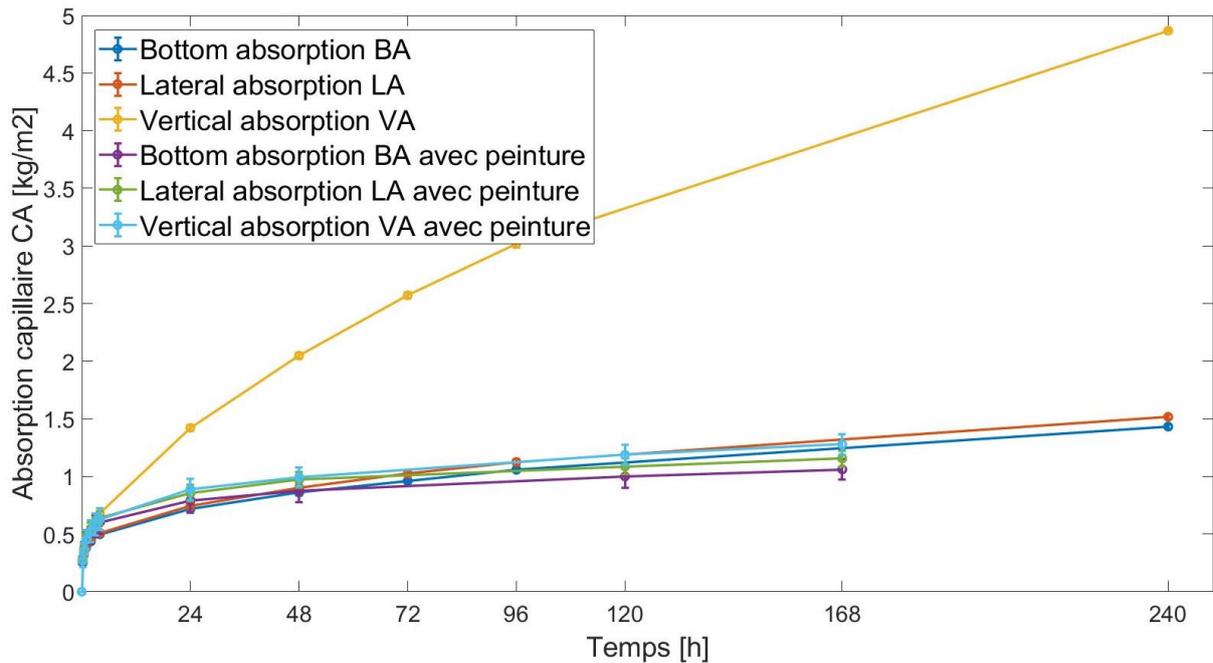


FIGURE 4.27 – Absorption d’eau par capillarité avec et sans peinture sur les surfaces non testées, échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé

des autres surfaces se fait plus remarquer pour l’absorption par la surface verticale puisque cette surface est plus petite. La FIGURE 4.27 indique que l’absorption d’eau par capillarité ne dépend pas fortement de la surface par laquelle elle a lieu. En effet, dans le cas avec peinture, des valeurs d’absorption très similaires ont été mesurées pour les surfaces du bas, latérales et verticales.

Finalement, la FIGURE 4.28 compare l’absorption d’eau par capillarité des échantillons moulés à celle des échantillons imprimés pendant les 24 premières heures dans l’eau.

La FIGURE 4.28 montre que l’absorption d’eau par unité de surface est plus faible pour les échantillons imprimés que pour les échantillons moulés. Après 24 heures, l’absorption d’eau par unité de surface est de $0,483 \text{ kg/m}^2$ pour les échantillons imprimés testés dans le sens de pose et de $0,491 \text{ kg/m}^2$ pour les échantillons imprimés testés dans le sens perpendiculaire à la pose alors qu’elle était aux alentours de $0,7 \text{ kg/m}^2$ pour les échantillons moulés. Le procédé de fabrication par impression 3D semble donc réduire l’absorption d’eau. Par contre, aucune différence dans les quantités d’eau absorbée ne peut être remarquée entre les échantillons imprimés testés dans le sens de pose et ceux testés dans le sens perpendiculaire. Le fait que l’absorption d’eau est la même dans les deux sens testés pour les échantillons imprimés confirme l’hypothèse formulée dans la section dédiée à l’adhérence qu’il n’y a pas de plan de faiblesse au niveau des interfaces entre les couches.

L’absorption d’eau par capillarité peut également donner une indication sur la taille des pores ouvertes et des capillaires. Les courbes de la FIGURE 4.28 peuvent être approximées par la suite de deux segments linéaires avec des pentes différentes. Pour chacune des courbes, la première partie linéaire se trouve entre 0h et 1h et a une pente beaucoup plus importante que la deuxième partie linéaire qui se trouve entre 1h et 24h. Puisque l’absorption d’eau par capillarité se fait d’abord par les capillaires plus grossiers, la première partie linéaire caractérise l’absorption d’eau par les capillaires grossiers alors que

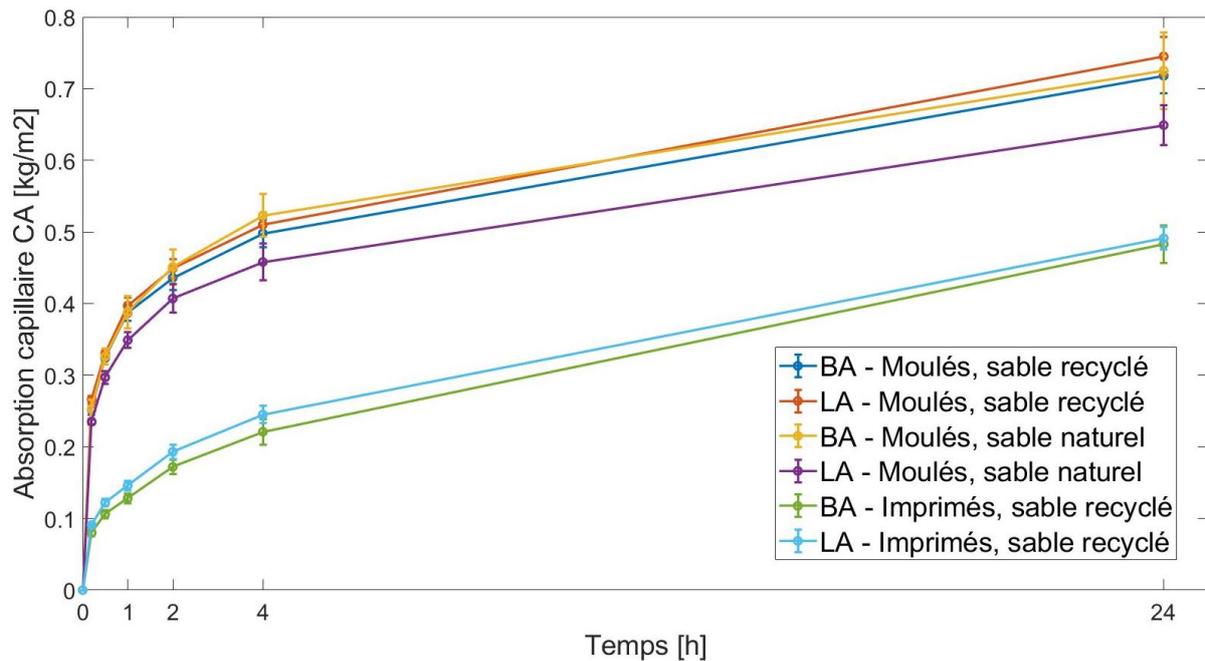


FIGURE 4.28 – Absorption d’eau pour les trois séries d’échantillons testées

la deuxième partie linéaire caractérise l’absorption d’eau par les capillaires fines. On peut observer à la FIGURE 4.28 que la pente de la première partie linéaire (entre 0h et 1h) est beaucoup plus importante pour les échantillons moulés que pour les échantillons imprimés. Par contre, la pente de la deuxième partie linéaire (entre 1h et 24h) est similaire pour les échantillons moulés et les échantillons imprimés. De cela, on peut conclure qu’il y a plus de capillaires grossiers dans les échantillons moulés, alors que la porosité fine ouverte est similaire pour les échantillons moulés et imprimés.

En conclusion, l’utilisation du sable recyclé ne semble pas avoir d’influence majeure sur l’absorption d’eau par capillarité puisque les échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé présentent des performances similaires à ceux avec le mortier de référence à base de sable naturel. Par contre, des différences significatives peuvent être observées entre les échantillons moulés et les échantillons imprimés : l’absorption d’eau est considérablement plus faible dans le cas des échantillons imprimés, quel que soit le sens dans lequel ceux-ci sont testés.

4.6 Comportement au gel - dégel

Méthode

Dans le cadre du projet CIRMAP, des pièces de mobilier urbain sont imprimées. Puisque ces pièces seront placées en Belgique dans l'environnement extérieur, leur comportement face à des cycles de gel-dégel est d'une importance majeure pour leur durabilité. Les essais du comportement au gel-dégel sont réalisés selon la norme CEN/TS 12390-9 (slab test). Il faut noter que cette norme a été développée pour des bétons et non pour des mortiers. Elle est néanmoins utilisée dans le cadre de ce travail en raison de l'absence d'une norme spécifique aux mortiers. À nouveau, les trois séries d'échantillons sont testés : des échantillons moulés à base de sable naturel, des échantillons moulés à base de sable recyclé et des échantillons imprimés à Douai à base de sable recyclé. Pour chacune de ces trois séries, 12 échantillons sont testés :

- 4 qui seront soumis à des cycles de gel-dégel en présence d'une couche d'eau déminéralisée (couche de 3 mm d'épaisseur sur la surface d'essai),
- 4 qui seront soumis à des cycles de gel-dégel en présence d'une couche de solution saline (3% NaCl) (couche de 3 mm d'épaisseur sur la surface d'essai),
- 4 qui seront soumis à des cycles de gel-dégel en l'absence d'une solution.

En testant ces trois conditions, les effets de l'eau et des sels de déverglaçage peuvent être analysés. Afin d'évaluer la résistance au gel-dégel, les particules écaillées sont récoltées de la surface d'essai des échantillons après 7, 14, 28, 56 et 91 cycles. Les échantillons étaient préparés comme décrit plus haut dans le chapitre "matériaux et fabrication". Toutes leurs surfaces, à l'exception des surfaces d'essai, sont isolées thermiquement. Les échantillons sont alors placés dans le réfrigérateur et soumis à des cycles de gel-dégel. Chaque cycle de gel-dégel dure 24 heures et suit le déroulement décrit à la FIGURE 4.29 et à la TABLE 4.9 [CEN/TS 12390-9] :

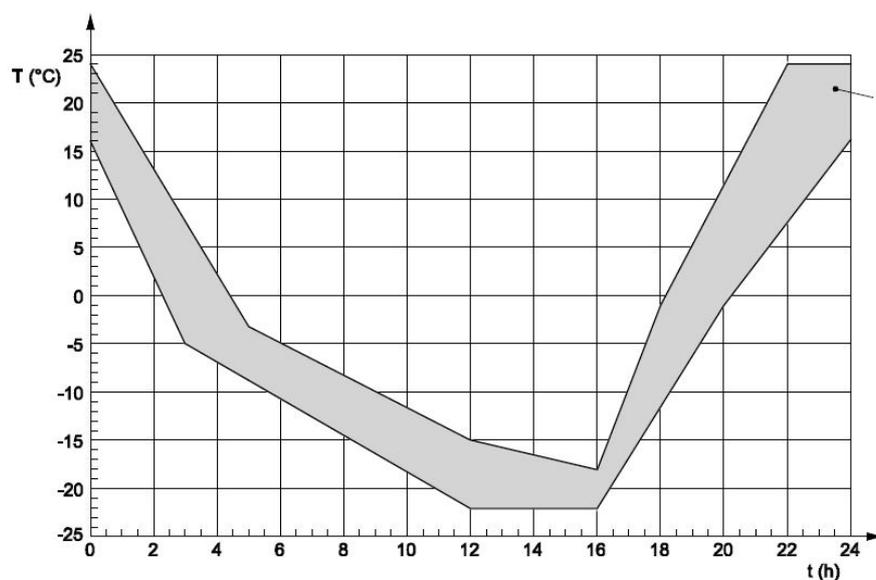


FIGURE 4.29 – Déroulement des cycles de gel-dégel [CEN/TS 12390-9]

Temps [h]	Température borne inférieure [°C]	Temps [h]	Température borne supérieure [°C]
0	+16	0	+24
3	-5	5	-3
12	-22	12	-15
16	-22	16	-18
20	-1	18	-1
24	+16	22	+24

TABLE 4.9 – Bornes des températures lors d’un cycle de gel-dégel réalisé selon la norme CEN/TS 12390-9 (slab test)

Après 7, 14, 28, 56 et 91 cycles, les particules écaillées sont récoltées pendant la phase de dégel (entre 20h et 24h). Pour cela, les surfaces sont rincées avec de l’eau déminéralisée et les particules écaillées sont collectées dans des filtres. Ces filtres ont préalablement été séchés pendant au moins 24 heures dans une étuve à 105°C. Quand ils sont repris de l’étuve, ils sont directement pesés avant de commencer l’essai, dans le but de connaître leur masse sèche. Une fois les particules écaillées récoltées, les couches de solution de 3 mm d’épaisseur sont renouvelées pour les échantillons testés en présence d’eau déminéralisée ou de solution saline. Les filtres contenant les particules écaillées sont ensuite rincés plusieurs fois avec de l’eau déminéralisée et placés dans l’étuve à 105°C pendant 24 heures. La masse de particules écaillées est alors obtenue en pesant les filtres avec les particules après 24 heures et en soustrayant la masse des filtres secs. Pour obtenir finalement la masse cumulée après un certain nombre de cycles, cette masse de particules écaillées est ajoutée à toutes les masses de particules écaillées qui ont déjà été mesurées précédemment pour la série testée.

Les résultats sont exprimés en termes de quantité de matériau écaillé par unité de surface après le nombre de cycles n , selon la formule suivante [CEN/TS 12390-9] :

$$S_n = \frac{m_{s,n}}{A} \cdot 1000 \quad (4.5)$$

avec

- S_n la masse du matériau écaillé après n cycles de gel-dégel, mis à l’échelle par rapport à la surface d’essai, en kg/m^2 ,
- $m_{s,n}$ la masse cumulée des particules écaillées et séchées après n cycles, en g,
- A l’aire de la surface d’essai de l’échantillon, en mm^2 [CEN/TS 12390-9].

Lors de la réalisation de l’essai de gel-dégel, des problèmes avec le réfrigérateur ont été rencontrés. Celui-ci est tombé en panne pendant une durée totale de deux semaines et n’a plus pu se refroidir en-dessous du point de congélation. Les cycles de gel-dégel ont alors été interrompus pendant une durée de 14 jours. Au moment de cette interruption, les échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé avaient déjà subi 38 cycles de gel-dégel, les échantillons moulés avec le mortier à base de sable naturel 31 cycles de gel-dégel et les échantillons imprimés 24 cycles de gel-dégel. Après deux semaines, le réfrigérateur a été réparé et les cycles de gel-dégel ont été repris (au 39ème / 32ème / 25ème cycle). C’est la raison pour laquelle il est important de noter que les résultats sont exprimés en fonction du nombre de cycles de gel-dégel que les échantillons ont subis et non en fonction du nombre de jours.

Résultats

Indépendamment de la série testée, la masse des particules écaillées était globalement très faible, même après 91 cycles de gel-dégel. Très peu d'écaillage a été observé ce qui indique que les échantillons testés ont une très bonne résistance aux cycles de gel-dégel. La FIGURE 4.30 montre l'état de surface final après 91 cycles des échantillons moulés à base de sable recyclé. Les quatre échantillons de la rangée supérieure sont ceux qui ont été testés en présence d'une couche d'eau déminéralisée alors que les quatre échantillons au milieu ont été testés en présence d'une couche de solution saline (3% NaCl). Pour les quatre échantillons de la rangée inférieure, aucune solution n'était présente.



FIGURE 4.30 – État de surface final après 91 jours pour les échantillons moulés à base de sable recyclé



FIGURE 4.31 – État de surface final après 91 jours pour les échantillons moulés à base de sable naturel



FIGURE 4.32 – État de surface final après 91 jours pour les échantillons imprimés à base de sable recyclé

La FIGURE 4.31 montre l'état de surface final après 91 cycles des échantillons moulés à base de sable naturel. À nouveau, les quatre échantillons de la rangée supérieure ont été testés en présence d'eau déminéralisée, les quatre échantillons de la rangée du milieu en présence de solution saline et les quatre échantillons de la rangée inférieure sans solution.

Finalement, la FIGURE 4.32 montre l'état de surface final après 91 cycles des échantillons imprimés à base de sable recyclé. L'arrangement des échantillons (eau / solution saline / sans solution) sur la photo est le même que pour les deux images précédentes.

Les FIGURES 4.30, 4.31 et 4.32 indiquent que l'état de surface final après 91 cycles de gel-dégel est d'une bonne qualité, quelle que soit la série testée et quelle que soit la condition (eau / solution saline / sans solution). En effet, pour aucun des échantillons,

une dégradation de surface majeure n'était présente. 91 cycles est un nombre important de cycles de gel-dégel, qui en réalité dans un environnement extérieur prend énormément de temps pour se produire. Juste en se basant sur l'état de surface après 91 cycles, il peut déjà être conclu que le mortier présente une bonne durabilité au gel-dégel, et cela indépendamment du type de sable (naturel de Saint Bonnet / recyclé de Tradecowall) et du mode de fabrication (moulé / imprimé).

Les résultats présentés dans la suite sont exprimés en fonction de la quantité de matériau écaillé par unité de surface S_n [kg/m²]. Pour chacune des séries d'échantillons, la moyenne a été calculée pour les quatre échantillons qui étaient testés sous la même condition (en présence d'eau déminéralisée / en présence de solution saline / sans solution présente). L'ensemble des résultats peut être trouvé dans l'ANNEXE A.9. La FIGURE 4.33 montre les moyennes obtenues pour les échantillons imprimés avec le mortier à base de sable recyclé, en fonction de la solution qui était présente ou non sur la surface d'essai lors de cycles de gel-dégel. Les masses écaillées par unité de surface présentées aux différentes échéances sur ce graphique sont les quantités cumulées de particules écaillées après ce nombre de cycles.

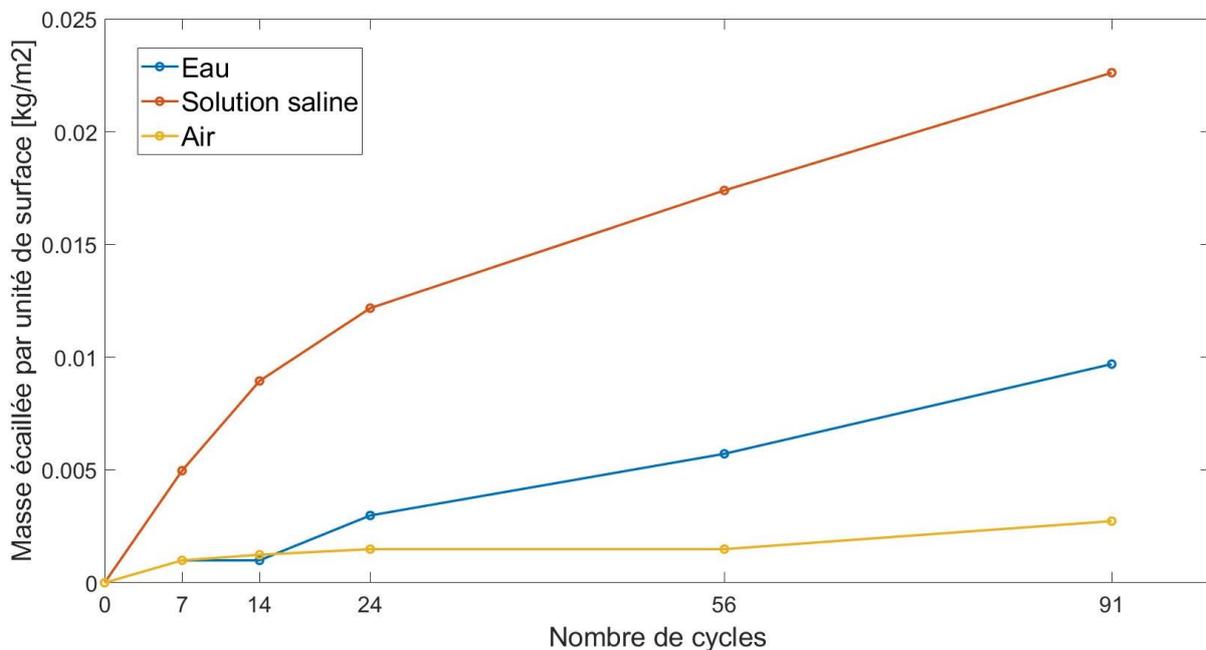


FIGURE 4.33 – Comparaison des conditions : eau, solution saline, air (échantillons imprimés à base de sable recyclé)

Tout d'abord, il faut remarquer que les quantités cumulées de matériau écaillé par unité de surface sont très faibles, quelle que soit la solution présente. En comparant les trois conditions testées, l'écaillage est le plus important pour les échantillons qui ont subi les cycles de gel-dégel en présence de la solution saline. En ce qui concerne les deux autres conditions testées, plus de particules écaillées peuvent être trouvées dans le cas des échantillons testés en présence d'eau déminéralisée que pour les échantillons testés sans solution. La FIGURE 4.33 montre les résultats obtenus pour les échantillons imprimés. Comme il peut être observé dans l'ANNEXE A.9, les tendances sont les mêmes pour les deux autres séries d'échantillons testées : la quantité de particules écaillées est toujours la plus importante en présence de la solution saline et la moins importante lorsqu'aucune

solution n'est présente.

La condition qui cause le moins d'écaillage est celle où aucune solution n'est présente sur la surface d'essai. Dans ce cas, la quantité cumulée de matériau écaillé par unité de surface est quasi nulle, quel que soit le type de sable utilisé et quel que soit le mode de fabrication. Même après 91 cycles de gel-dégel, l'ordre de grandeur est encore si petit qu'on ne peut pas tirer de conclusions significatives par rapport aux différences de comportement entre les trois séries d'échantillons. En effet, l'ordre de grandeur est tellement petit que déjà des imprécisions sur la masse des particules écaillées de l'ordre de quelques milligrammes peuvent avoir une influence significative. La seule conclusion qui peut être tirée dans ce cas où aucune solution n'est présente est que les quantités de particules écaillées sont minimales pour les trois séries testées.

La FIGURE 4.34 compare la résistance aux cycles de gel-dégel des trois séries dans le cas où une couche d'eau déminéralisée est présente sur la surface d'essai. La quantités cumulées de particules écaillés sont toujours très faibles. Pour cette raison, uniquement les quantités cumulées de particules écaillées après 91 cycles de gel-dégel sont comparées. En effet, dans le cas d'un nombre de cycles plus petit, les quantités de particules cumulées sont trop petites pour pouvoir être comparées. En présence d'une couche d'eau déminéralisée, les échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé sont ceux qui présentent la quantité la plus importante de particules écaillées. Les échantillons moulés avec le mortier à base de sable naturel ainsi que les échantillons imprimés perdent moins de particules et ont des performances relativement similaires.

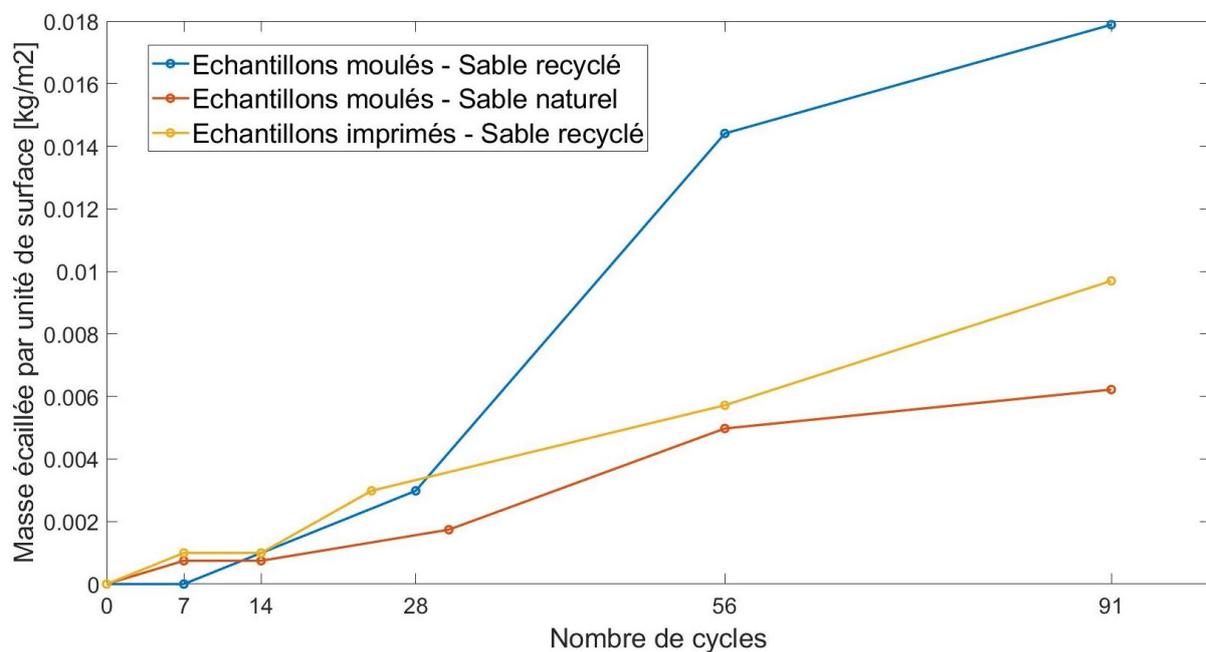


FIGURE 4.34 – Essais de gel-dégel avec eau

Finalement, la FIGURE 4.35 montre les quantités cumulées de matériau écaillé par unité de surface dans la pire des trois conditions testées, c'est-à-dire lorsqu'une couche de solution saline est présente sur la surface d'essai lors des cycles de gel-dégel. À nouveau, il est conseillé de se concentrer sur les résultats après 91 cycles de gel-dégel. Lorsqu'on compare les trois séries d'échantillons testées, la même observation que dans le cas de la couche

d'eau peut être faite : la quantité de matériau écaillé est la plus importante pour les échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé. De plus, les échantillons moulés avec le mortier à base de sable naturel et les échantillons imprimés se comportent à nouveau de manière similaire.

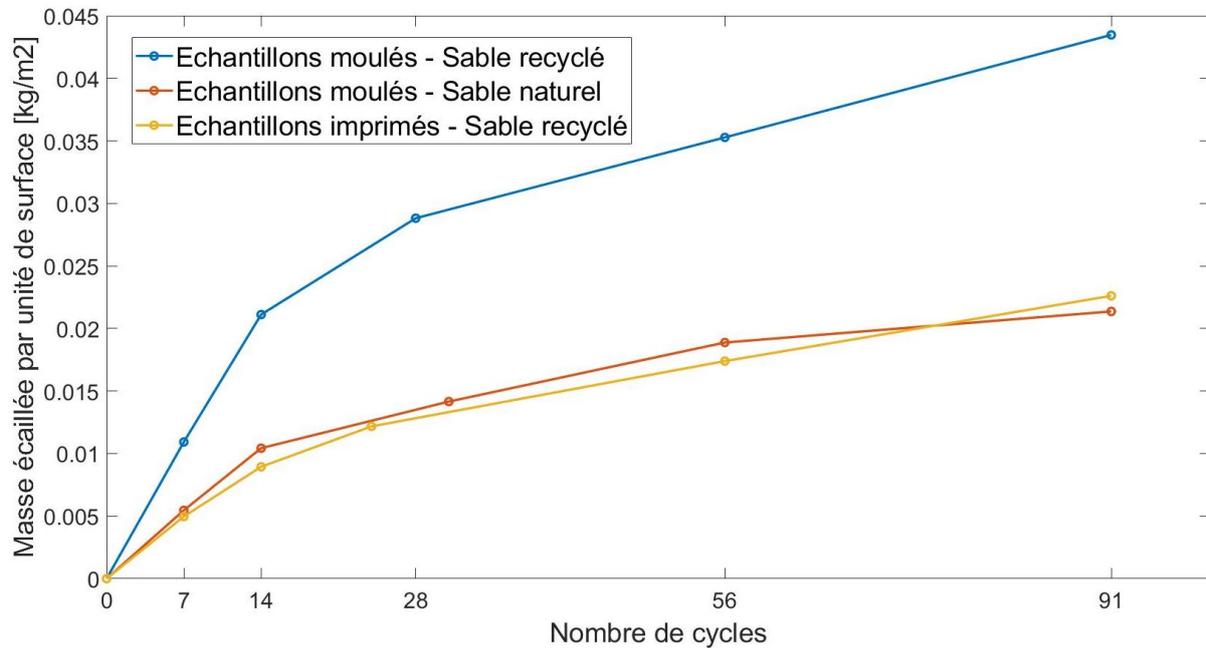


FIGURE 4.35 – Essais de gel-dégel avec solution saline

Dans la littérature, il a été mentionné par BAROGHEL-BOUNY et al. [BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS 2021] que dans le cas d'un rapport E/C inférieur à 0,32, aucune précaution particulière n'est nécessaire pour les bétons qui seront soumis à un environnement extérieur avec des cycles de gel-dégel. Les auteurs notent que dans ce cas, le béton est suffisamment compact pour présenter une bonne résistance aux cycles de gel-dégel. Avec un rapport E/C de 0,29, le mortier testé dans le présent travail rentre dans ce critère. Les quantités très faibles de particules écaillées observées lors des essais sont donc bien en accord avec la bonne durabilité aux cycles de gel-dégel prédite par BAROGHEL-BOUNY et al. [BAROGHEL-BOUNY et DIERKENS 2021].

La conclusion principale qui peut être tirée des essais de gel-dégel est que les échantillons testés présentent tous une très bonne résistance aux cycles de gel-dégel, quel que soit le type de sable utilisé (naturel de Saint Bonnet ou recyclé de Tradecowall) et quel que soit le mode de fabrication. De plus, la performance reste bonne même si une couche de solution saline est présente sur la surface d'essai. L'explication principale de cette bonne résistance aux cycles de gel-dégel est le rapport E/C très faible de 0,29. Cela conduit à un mortier compact avec une porosité faible ce qui a une influence positive sur sa résistance aux cycles de gel-dégel. Les résultats obtenus confirment ce qui a été mentionné dans la revue de littérature : un rapport E/C faible est associé à une bonne résistance aux cycles de gel-dégel. De plus, aucune couche de laitance n'était présente pour les échantillons testés. "La laitance est un mélange liquide d'eau, de ciment et de fines qui tend à remonter à la surface du béton lors de la prise [ARCANE INDUSTRIES 2023]". Cette couche est d'une moindre qualité et résistance et s'écaille très vite sous des cycles de gel-dégel.

Le rapport E/C très faible ainsi que la granulométrie fine permettent donc d'obtenir des

mortiers compacts d'une bonne qualité qui ne présentent aucun problème de durabilité face aux cycles de gel-dégel. Puisque tous les échantillons testés résistent très bien aux cycles de gel-dégel, il peut être conclu que ni l'utilisation du sable recyclé ni la fabrication par impression 3D n'ont un effet négatif sur la résistance au gel. La fabrication par impression 3D semble même avoir un effet bénéfique sur la résistance au gel comparé à la fabrication classique.

4.7 Carbonatation

Méthode

Les essais de carbonatation sont réalisés selon la norme NF EN 12390-12. À nouveau, une norme s'appliquant au matériau béton a été utilisée par manque d'une norme similaire spécifique pour les mortiers. Les conditions d'essai sont telles que la vitesse de carbonatation est accélérée. La vitesse de carbonatation est définie comme la "vitesse moyenne à laquelle le front de carbonatation pénètre le béton" [NF EN 12390-12]. À nouveau, des barrettes de taille 4 x 4 x 16 cm³ des trois types d'échantillons sont testés : des échantillons moulés à base de sable naturel, des échantillons moulés à base de sable recyclé et des échantillons imprimés à base de sable recyclé (imprimés à Limelette).

Après avoir durci dans l'eau pendant 28 jours, les échantillons sont soumis à un pré-conditionnement dans l'environnement ambiant du laboratoire pendant 14 jours. Après ces 14 jours de pré-conditionnement à une température de 20°C ± 2°C et une humidité relative de 60% ± 5%, les échantillons sont placés dans une enceinte dans laquelle la concentration en CO₂ est de 3% ± 0,5%. Après 7, 28 et 56 jours dans l'enceinte de carbonatation, des échantillons sont repris de l'enceinte afin de tester les effets de la carbonatation. De plus, des échantillons ont été testés le jour où les autres ont été placés dans l'enceinte (jour 0) pour évaluer leur carbonatation initiale. À chaque échéance, trois échantillons sont pris de l'enceinte de carbonatation et d'abord testés en flexion. Ensuite, de la solution phénolphthaléine qui est un indicateur de pH est pulvérisée sur les 6 surfaces de rupture obtenues. Après 30 minutes, la coloration des surfaces est analysée afin de déterminer la profondeur de carbonatation. De la carbonatation a eu lieu dans les zones où la surface en contact avec la solution phénolphthaléine est restée non colorée. Par contre, lorsque la surface se colore en violet, le phénolphthaléine indique que le pH se trouve entre 8 et 11 et que le front de carbonatation n'est pas encore arrivé dans cette zone. Lorsqu'une zone non colorée ainsi qu'une zone colorée sont présentes, la profondeur de carbonatation est mesurée en plusieurs points grâce à un pied à coulisse. Finalement, les six morceaux sont encore testés en compression afin de déterminer des éventuels changements de la résistance mécanique à cause de la carbonatation qui progresse [NF EN 12390-12].

Résultats

La FIGURE 4.36 montre l'évolution du front de carbonatation pour la série d'échantillons imprimés à Limelette. Les colorations des surfaces de rupture en flexion sur lesquelles de la solution phénolphthaléine a été pulvérisée indiquent la position de ce front de carbonatation. Les échantillons ont été testés après 0, 7, 28 et 56 jours dans l'enceinte de carbonatation. On peut voir sur les images qu'à toutes les échéances, même après 56 jours dans l'enceinte de carbonatation, toute la surface est colorée en violet et aucun front de carbonatation n'est visible.

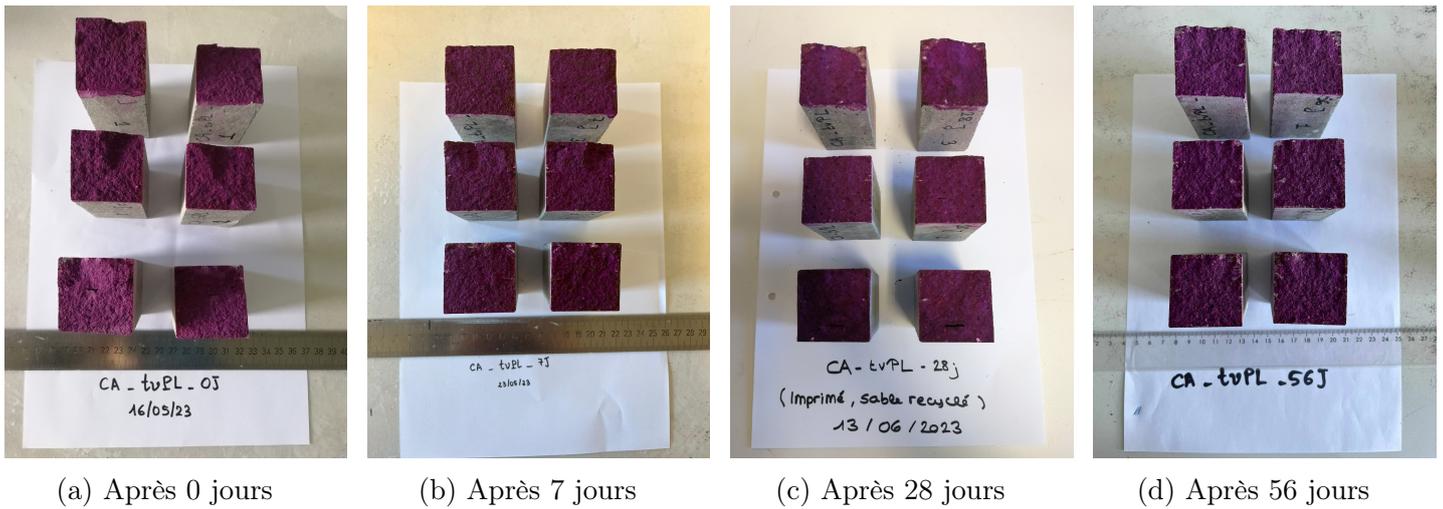


FIGURE 4.36 – Front de carbonatation pour les échantillons imprimés à Limelette

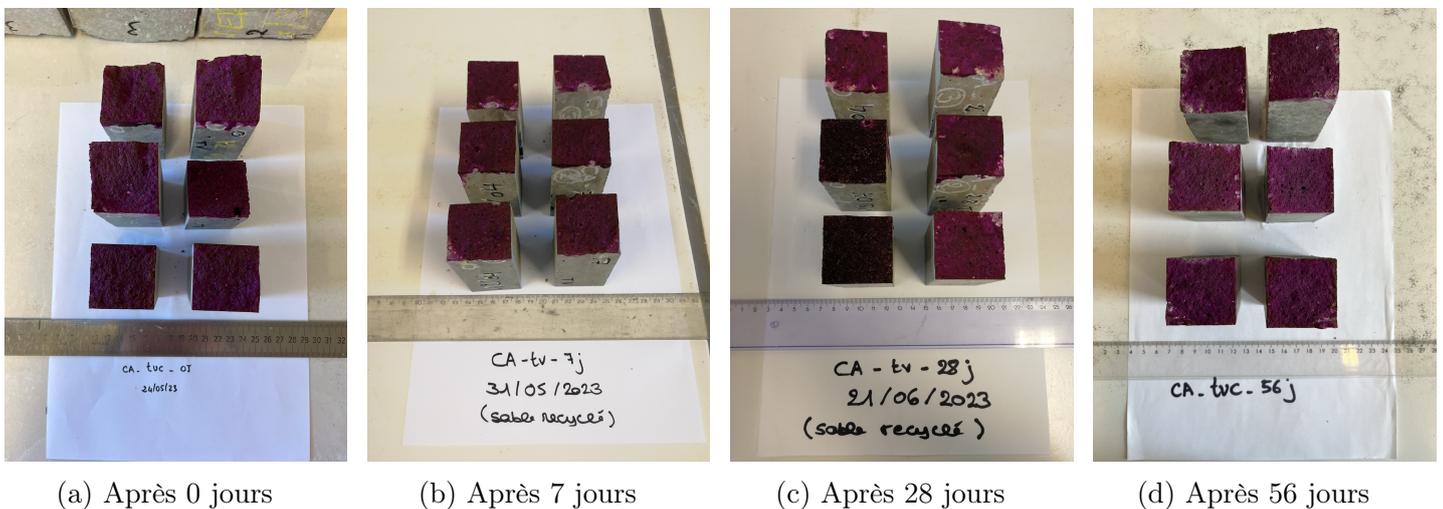
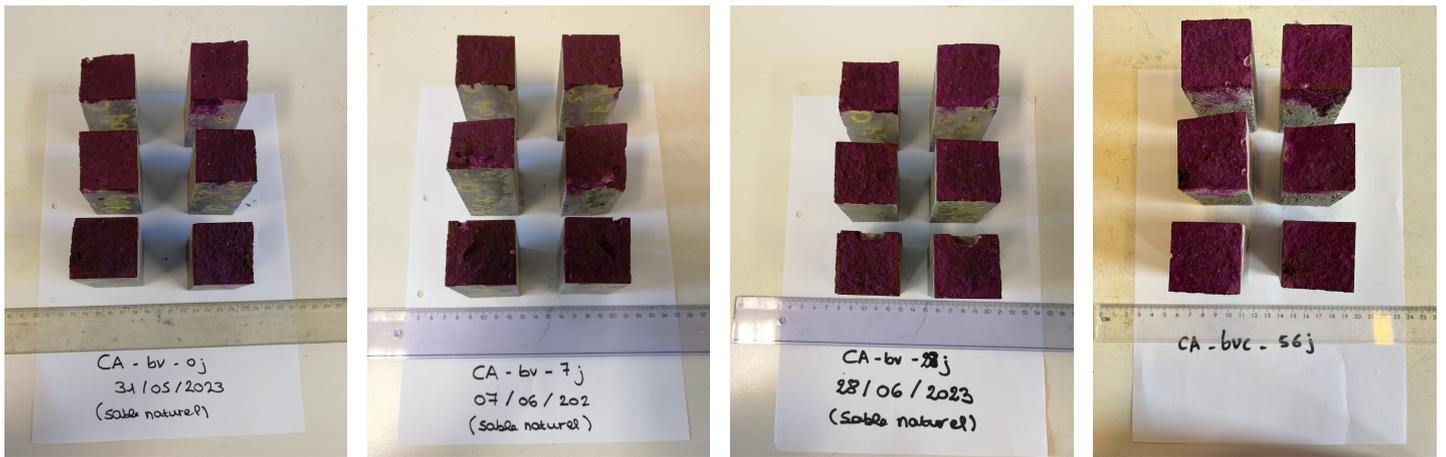


FIGURE 4.37 – Front de carbonatation pour les échantillons moulés à base de sable recyclé

Les observations pour les échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé (FIGURE 4.37) et avec le mortier de référence à base de sable naturel (FIGURE 4.38) sont très similaires à celles qui étaient faites pour les échantillons imprimés. En effet, après 7, 28 et 56 jours dans l'enceinte de carbonatation avec 3% de CO_2 , le front de carbonatation n'est pas encore visible pour aucune des trois séries testées. Quelle que soit la série testée, la surface de rupture entière se colore en contact avec la solution phénolphtaléine. Comme la carbonatation progresse très lentement et le front de carbonatation n'est pas encore visible après 56 jours dans l'enceinte de carbonatation, il n'est pas possible de calculer une vitesse de carbonatation.

Les résultats des essais de flexion et de compression sur les échantillons après 0, 7, 28 et 56 jours dans l'enceinte de carbonatation sont donnés dans l'ANNEXE A.8. Après 7, 28 et même 56 jours dans l'enceinte de carbonatation à 3% de CO_2 , aucune variation significative de la résistance mécanique ne peut être observée, que ce soit en flexion ou en compression. Pour les trois séries testées, les résistances obtenues après 7, 28 et 56 jours dans l'enceinte de carbonatation restent similaires à celles des échantillons de référence qui n'étaient pas placés dans l'enceinte.



(a) Après 0 jours

(b) Après 7 jours

(c) Après 28 jours

(d) Après 56 jours

FIGURE 4.38 – Front de carbonatation pour les échantillons moulés à base de sable naturel

En conclusion, les trois séries d'échantillons testées ont un comportement très similaire lors de l'essai de carbonatation et résistent toutes les trois très bien à la carbonatation.

Chapitre 5

Analyse transversale des résultats

Dans le cadre de ce travail de fin d'études ainsi que du projet CIRMAP, différents essais ont été réalisés au laboratoire sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci du mortier développé. Le but de ces essais était de mettre en évidence d'une part l'influence de la substitution du sable naturel par du sable recyclé et d'autre part l'influence du mode de fabrication par impression 3D.

5.1 Comparaison mortier à base de sable naturel - mortier à base de sable recyclé

Dans cette partie, les propriétés des échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé seront comparées aux propriétés des échantillons moulés avec le mortier de référence à base de sable naturel. Cela permet d'analyser l'influence de la substitution de 100 % du sable naturel par du sable recyclé. La composition du mortier à base de sable recyclé a été développée pour que le mortier soit imprimable. Le mortier de référence à base de sable naturel a été obtenu en faisant une substitution massique et présente des propriétés rhéologiques très similaires au mortier à base de sable recyclé, comme vérifié lors des essais à l'état frais.

La résistance en compression est élevée pour les deux mortiers testés, avec une valeur aux alentours de 80 MPa après 28 jours. Le mortier à base de sable naturel est légèrement plus résistant en compression que le mortier à base de sable recyclé avec une différence de résistance d'environ 5%. Cependant, pour obtenir une résistance proche de 80 MPa après 28 jours, il faut que les conditions de cure soient favorables. Pour avoir de bonnes conditions de cure, les échantillons doivent être placés dans l'eau à 20°C après le démoulage. Lorsque la cure a lieu dans un environnement ambiant avec une humidité relative de 60% \pm 5%, les résistances en compression après 28 jours restent largement en-dessous des 80 MPa, avec une valeur d'environ 50 MPa après 28 jours.

Les essais de porosité accessible à l'eau ont montré que le mortier à base de sable recyclé présente une porosité accessible plus élevée que le mortier à base de sable naturel (20% - 21% pour le mortier à base de sable recyclé contre 17% - 18% pour le mortier à base de sable naturel). Cette différence peut être attribuée à l'utilisation de granulats recyclés moins denses et plus poreux que les granulats naturels, comme expliqué dans la revue de littérature. La masse volumique apparente du mortier à base de sable recyclé est inférieure à celle du mortier à base de sable naturel, ce qui est bien cohérent avec les résultats

obtenus pour la porosité. Puisque la masse volumique apparente donne une indication sur la porosité totale (ouverte + fermée), il peut être conclu que la porosité totale ainsi que la porosité accessible sont toutes les deux plus élevées pour le mortier à base de sable recyclé. La porosité plus élevée du mortier à base de sable recyclé explique bien sa résistance en compression légèrement inférieure à celle du mortier à base de sable naturel. En effet, une porosité plus élevée signifie qu'il y a moins de matière solide qui peut résister à l'effort de compression ce qui se traduit par une résistance diminuée.

En ce qui concerne l'absorption d'eau par capillarité, aucune différence significative n'est observable entre les échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé et les échantillons moulés avec le mortier de référence à base de sable naturel. De plus, les résultats obtenus sont également indépendants de la surface par laquelle l'absorption d'eau a lieu. L'utilisation du sable recyclé ne semble donc pas avoir d'influence majeure sur l'absorption d'eau par capillarité.

En résumé, la substitution de 100% du sable naturel par du sable recyclé a comme effet de diminuer légèrement la résistance en compression et d'augmenter la porosité du mortier. Cependant, ces différences restent mineures par rapport à ce qui a été observé dans d'autres études mentionnées dans la revue de littérature. En effet, les propriétés des échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé restent très bonnes. Cela peut s'expliquer par la quantité élevée en ciment, le rapport E/C très faible et les adjuvants utilisés pour rendre le mortier imprimable. Ces facteurs permettent d'obtenir un matériau très dense, compacte et d'une bonne qualité. Dans le cas de la composition spécifique développée pour l'impression 3D et testée dans le cadre de ce travail, la substitution du sable naturel par du sable recyclé ne pose donc aucun problème pour l'utilisation du mortier.

5.2 Comparaison échantillons moulés - échantillons imprimés

Dans cette partie, les propriétés des échantillons imprimés avec le mortier à base de sable recyclé seront comparées aux propriétés des échantillons moulés avec le même sable recyclé. Cela permet d'analyser l'influence du processus de fabrication par impression 3D par rapport à une fabrication classique.

Tout d'abord, des essais de cisaillement et de traction directe ont été réalisés sur les échantillons imprimés afin de tester l'adhérence entre les couches. Pour les deux types d'essai, il n'était pas possible d'identifier un plan de rupture préférentiel ce qui signifie que la rupture n'a pas systématiquement lieu au niveau des interfaces. Cela indique que les interfaces ne constituent pas de plans de faiblesse et que l'adhérence entre les couches n'est pas plus faible que la cohésion au sein d'une couche ce qui est favorable d'un point de vue structurel. La bonne adhérence peut s'expliquer par le fait que contrairement à la plupart des mortiers développés pour l'impression 3D qu'on peut trouver dans la littérature, aucun accélérateur de prise n'a été utilisé dans la composition présente.

La résistance en compression des échantillons imprimés est inférieure à celle des échantillons moulés (à 28 jours, diminution de 33,5% dans le cas des échantillons testés dans le sens de pose et diminution de 14,6% dans le cas des échantillons testés dans le sens perpendiculaire à la pose). Cependant, cette diminution de résistance ne peut pas complètement être attribuée au processus d'impression en soi. En effet, les conditions de cure

sont différentes et moins favorables pour les échantillons imprimés que pour les échantillons moulés. Pendant que les échantillons moulés étaient directement placés dans la chambre humide, les échantillons imprimés sont restés sur le site d'impression pendant les premières heures et ont ensuite été transportés au laboratoire. L'humidité relative moins élevée pendant les premières heures de cure a probablement une influence négative sur les propriétés mécaniques atteintes ultérieurement. De plus, aucun coffrage qui pourrait protéger le mortier de l'environnement extérieur lors de sa cure n'est présent dans le cas des échantillons imprimés. La surface exposée à l'air ambiant pendant les premières 24 heures après la fabrication est donc beaucoup plus importante dans le cas des échantillons imprimés que dans le cas des échantillons moulés. Concernant les échantillons imprimés, une anisotropie a été détectée puisque la résistance en compression des échantillons testés dans le sens de pose est considérablement plus faible que celle des échantillons testés dans le sens perpendiculaire à la pose.

Concernant la porosité, les échantillons imprimés présentent une porosité accessible à l'eau plus faible que les échantillons moulés. En effet, des valeurs de porosité aux alentours de 18% sont obtenues pour les échantillons imprimés ce qui est similaire aux valeurs obtenues pour les échantillons moulés avec le mortier de référence à base de sable naturel. Cependant, leur masse volumique apparente est similaire à celle des échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé ce qui indique que le volume total des pores est similaire pour les échantillons moulés et imprimés. Deux explications possibles pour ces résultats de porosité accessible et de masse volumique apparente sont que la porosité des échantillons imprimés est soit plus fermée, soit aussi ouverte mais plus fine et tortueuse que celle des échantillons moulés. Quelle que soit l'explication, le processus de fabrication par impression 3D semble conduire à des propriétés de porosité et de transport améliorées. Cela est confirmé par l'essai d'absorption capillaire. En effet, cet essai a montré que l'absorption d'eau par capillarité des échantillons imprimés est avec $0,49 \text{ kg/m}^2$ considérablement plus faible que celle des échantillons moulés ($0,7 \text{ kg/m}^2$). De plus, l'essai d'absorption d'eau par capillarité indique que la quantité de capillaires fines est similaire pour les échantillons moulés et les échantillons imprimés alors que la quantité de capillaires plus grossiers, qui caractérisent la première heure d'absorption, est plus élevée dans le cas des échantillons moulés. La fabrication par impression 3D semble donc créer un réseau capillaire différent de la fabrication classique. Finalement, aucune anisotropie n'a pu être observée pour les échantillons imprimés lors de l'essai d'absorption d'eau par capillarité : les résultats obtenus pour les échantillons testés dans le sens de pose et ceux testés dans le sens perpendiculaire à la pose sont très similaires.

En résumé, les échantillons imprimés présentent des résistances en compression moins bonnes mais des propriétés de perméabilité meilleures que les échantillons moulés. Concernant la résistance en compression, il est important de noter que les conditions de cure pendant les premières heures n'étaient pas identiques pour les échantillons moulés et imprimés ce qui influence très probablement également les résultats. Cependant, cette résistance en compression réduite reste toujours suffisamment élevée pour pouvoir utiliser le mortier imprimé sans avoir de problème au niveau structurel. La fabrication par couches conduit à une anisotropie pour la résistance en compression. Par contre, aucune anisotropie n'a pu être observée pour l'absorption d'eau par capillarité.

5.3 Durabilité

Afin d'étudier la durabilité, des essais de gel-dégel et de carbonatation accélérée ont été réalisés. De plus, la résistance en compression, la porosité et l'absorption d'eau par capillarité donnent également des indications sur la durabilité. En effet, puisque chaque mécanisme de dégradation est lié à un processus de transport en phase gazeuse ou liquide, une porosité faible ainsi qu'une absorption d'eau faible sont favorables, non seulement d'un point de vue structurel mais également d'un point de vue de la durabilité. De plus, une microstructure plus compacte du mortier conduit non seulement à une résistance en compression plus élevée mais également à une durabilité améliorée.

Pour tous les échantillons testés, qu'ils soient moulés ou imprimés et à base de sable naturel ou recyclé, les quantités de particules écaillées lors des essais de gel-dégel étaient minimales, même après 91 cycles. Les essais ont montré que la solution saline est la condition la moins favorable, suivie par l'eau. Cependant, même en présence de solution saline sur la surface d'essai, les quantités de particules écaillées restent très petites. Les échantillons avec la porosité accessible la plus importante, c'est-à-dire les échantillons moulés avec le mortier à base de sable recyclé, présentent le plus de particules écaillées. Les échantillons moulés avec le mortier à base de sable naturel ainsi que les échantillons imprimés, qui ont déjà présenté des résultats similaires lors de l'essai de porosité accessible, présentent également des résultats similaires lors de l'essai de gel-dégel. Néanmoins, pour les trois séries testées, la résistance aux cycles de gel-dégel est excellente.

Les trois séries d'échantillons testées présentent également une très bonne résistance à la carbonatation. Après 28 jours dans l'enceinte de carbonatation à 3% de CO₂, aucun front de carbonatation ne devient perceptible en pulvérisant de la solution de phénolphthaléine sur la surface de rupture, quel que soit le type de sable utilisé dans le mortier (naturel de Saint Bonnet ou recyclé de Tradecowall) et quel que soit le mode de fabrication (moulé ou imprimé).

Les bonnes résistances aux cycles de gel-dégel et à la carbonatation peuvent être expliquées par le rapport E/C très faible de 0,29. Ce rapport E/C très faible ainsi que la granulométrie fine (0/2mm) permettent d'obtenir un mortier très compact avec une porosité faible. Grâce à la microstructure dense, il est difficile pour les différents agents (eau, CO₂, ...) de pénétrer dans le mortier. Dans le cas de la composition de mortier testée, les propriétés de durabilité sont très bonnes et ni la substitution du sable naturel par du sable recyclé, ni la fabrication par impression 3D ne posent des problèmes de durabilité.

Chapitre 6

Conclusion

L'objectif de ce travail de fin d'études était d'étudier les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité de pièces imprimées en 3D en utilisant un mortier à base de sable recyclé et de déterminer si ces pièces imprimées ont des propriétés suffisamment bonnes pour pouvoir être réellement utilisées. Pour cela, de nombreux essais ont été réalisés au laboratoire :

- Les essais de cisaillement et de traction directe ont montré que l'adhérence entre les couches est aussi bonne que la cohésion au sein d'une couche et qu'il n'y a pas de plans de faiblesse au niveau des interfaces.
- Les essais de compression ont révélé une anisotropie mais également une bonne résistance en compression, peu importe si les pièces sont testées dans le sens de pose ou dans le sens perpendiculaire à la pose.
- Les essais de porosité accessible à l'eau et d'absorption d'eau par capillarité ont montré que le processus de fabrication par impression 3D a l'air de créer un réseau capillaire différent par rapport à la fabrication classique. En effet, la fabrication par impression 3D semble améliorer les propriétés de porosité et de transport, ce qui est favorable d'un point de vue durabilité.
- Les quantités de particules écaillées étaient minimales lors des essais de gel-dégel, même en présence d'une solution saline sur la surface d'essai. Lors des essais de carbonatation, aucun front de carbonatation n'était visible après 56 jours. Les échantillons imprimés présentent donc de très bonnes résistances aux cycles de gel-dégel et à la carbonatation.

En résumé, le mortier testé est un matériau compact d'une très bonne qualité qui subit peu de vieillissement causé par son environnement. Aucun problème majeur n'a été détecté lors des essais au laboratoire, ni concernant les propriétés mécaniques, ni concernant la durabilité.

Ce mortier développé dans le cadre du projet CIRMAP qui contient une quantité élevée de ciment ainsi que 100% de sable recyclé peut donc effectivement être utilisé pour des impressions de mobilier urbain. La FIGURE 6.1 montre un rendu CaD du banc qui va être imprimé dans le cadre du projet CIRMAP. Les premières parties de ce banc ont déjà été imprimées et sont visibles à la FIGURE 6.2.

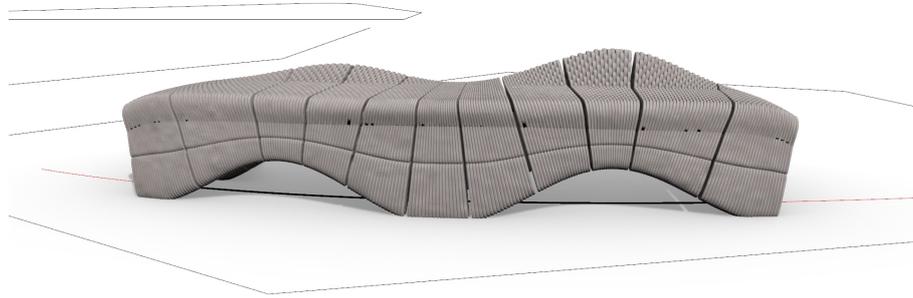


FIGURE 6.1 – Rendu CaD du banc imprimé dans le cadre du projet CIRMAP [Y. MUY et al. 2023]



FIGURE 6.2 – Images de parties du banc imprimé dans le cadre du projet CIRMAP [Y. MUY et al. 2023]

Bibliographie

- 3D NATIVES, publié par Mélanie W. (2018). *L'impression 3D de maisons, du rêve à la réalité*. [ONLINE]. URL : <https://www.3dnatives.com/impression-3d-de-maisons-31012018/>. (Consulté le 20/04/2023).
- (2019a). *Apis Cor participe à la construction du plus grand bâtiment imprimé en 3D à Dubai*. [ONLINE]. URL : <https://www.3dnatives.com/batiment-imprime-en-3d-apis-cor-29102019/>. (Consulté le 20/04/2023).
 - (2019b). *Frittage sélectif par laser, on vous explique tout!* [ONLINE]. URL : <https://www.3dnatives.com/frittage-selectif-par-laser/>. (Consulté le 22/04/2023).
 - (2020). *Un premier bâtiment résidentiel imprimé en 3D en Allemagne*. [ONLINE]. URL : <https://www.3dnatives.com/batiment-residentiel-imprime-en-3d-300920203/>. (Consulté le 20/04/2023).
 - (2021a). *Comment fonctionne une imprimante 3D béton?* [ONLINE]. URL : <https://www.3dnatives.com/imprimante-3d-beton-26012021/>. (Consulté le 20/04/2023).
 - (2021b). *Fonctionnement d'une imprimante 3D FDM par catégorie*. [ONLINE]. URL : <https://www.3dnatives.com/imprimantes-3d-fdm-060620173/>. (Consulté le 22/04/2023).
- 3D NATIVES, publié par Philippe G. (2021). *Retour sur les principaux ponts imprimés en 3D*. [ONLINE]. URL : <https://www.3dnatives.com/ponts-imprimes-en-3d-05112021/>. (Consulté le 22/04/2023).
- ABDELOUHAB, Sandra (2022). *Réunion d'état d'avancement du projet BEXTRUS - Impression 3D de Bétons par EXTRUtion*. [PRESENTATION (24/10/2022)].
- ABDELOUHAB, Sandra et Loris ARROTIN (2022). *Etat d'avancement du projet BEXTRUS*. [PRESENTATION (24/10/2022)].
- APISCOR (2019). *We print buildings*. [ONLINE]. URL : <https://apis-cor.com/>. (Consulté le 30/04/2023).
- ARCANE INDUSTRIES, Groupe Arcane (2023). *La laitance du ciment*. [ONLINE]. URL : <https://www.arcane-industries.fr/details-la+laitance+du+ciment-60.html#:~:text=La%20laitance%20est%20un%20m%C3%A9lange,%C3%A0%20la%20surface%20du%20b%C3%A9ton..> (Consulté le 12/07/2023).
- AREBS (2023). *CIRMAP*. [ONLINE]. URL : <https://www.arebs.be/projets-pilotes/cirmap/>. (Consulté le 31/05/2023).
- ASPRONE, Domenico, Costantino MENNA, Freek P. BOS, Theo A.M. SALET, Jaime MATA-FALCÓN et Walter KAUFMANN (2018). “Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete”. In : *Cement and Concrete Research* Volume 112, Pages 111-121. ISSN : 0008-8846. DOI : 10.1016/j.cemconres.2018.05.020. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884618300309>.
- BAIGARINA, A., E. SHEHAB et M.H. ALI (2023). “Construction 3D printing : a critical review and future research directions”. In : *Progress in additive manufacturing* Volume

8. DOI : 10.1007/s40964-023-00409-8. URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/s40964-023-00409-8>.
- BAROGHEL-BOUNY, Véronique (2005). “Nouvelle approche de la durabilité du béton. Indicateurs et méthodes”. In : *Techniques de l'ingénieur - Les superstructures du bâtiment* Base documentaire : TIP253WEB. DOI : 10.51257/a-v1-c2245. URL : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/les-betons-dans-la-construction-42221210/nouvelle-approche-de-la-durabilite-du-beton-indicateurs-et-methodes-c2245/>.
- BAROGHEL-BOUNY, Véronique et Michaël DIERKENS (2021). “Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel : environnements hivernaux rigoureux”. In : *Les collections de l'Ifsttar techniques et méthodes - guide technique - Référence : GTI6*. Université Gustave Eiffel. ISSN : 2492-5438. URL : <https://hal.science/hal-03555663v1/file/doc00034167.pdf>.
- BOS, F.P., C. MENNA, M. PRADENA, E. KREIGER, W.R. LEAL DA SILVA, A.U. REHMAN, D. WEGER, R.J.M. WOLFS, Y. ZHANG, L. FERRARA et V. MECHTCHERINE (2022). “The realities of additively manufactured concrete structures in practice”. In : *Cement and Concrete Research* Volume 156. ISSN : 0008-8846. DOI : 10.1016/j.cemconres.2022.106746. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884622000370>.
- BOS, Freek, Rob WOLFS, Zeeshan AHMED et Theo SALET (2016). “Additive manufacturing of concrete in construction : potentials and challenges of 3D concrete printing”. In : *Virtual and Physical Prototyping* Volume 11 Issue 3, Pages 209-225. ISSN : 1745-2767. DOI : 10.1080/17452759.2016.1209867. URL : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17452759.2016.1209867>.
- CLIMATOSCOPE (2023). *Conséquences sur les changements climatiques d'initiatives de développement durable : regard sur le secteur du ciment portland*. [ONLINE]. URL : <https://climatoscope.ca/article/consequences-sur-les-changements-climatiques-dinitiatives-de-developpement-durable-regard-sur-le-secteur-du-ciment-portland/>. (Consulté le 27/04/2023).
- COURARD, Luc (2020). *GCIV0184-5 Matériaux de construction*. [COURS, Faculté des sciences appliquées, Université de Liège].
- (2021). *GCIV0201-1 Technologie des bétons et nouveaux matériaux*. [COURS, Faculté des sciences appliquées, Université de Liège].
- COURTOIS, Nicolas, David BULTEEL, Luc COURARD, Julien HUBERT et Yeakleang MUY (2021a). *CIRMAP - Characterization and printability results*.
- (2021b). *CIRMAP - Characterization of printable RFA-based mortars at fresh state*.
- (2021c). *CIRMAP - Formulation of printable RFA-based mortars*.
- DE SCHUTTER, Geert, Karel LESAGE, Viktor MECHTCHERINE, Venkatesh NAIDU NERELLA, Guillaume HABERT et Isolda AGUSTI-JUAN (2018). “Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials”. In : *Cement and Concrete Research* Volume 112, Pages 25-36. ISSN : 0008-8846. DOI : 10.1016/j.cemconres.2018.06.001. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888461731219X>.
- DE VLIÉGER, Jentel, Luc BOEHME, Jan BLAAKMEER et Jiabin LI (2023). “Buildability assessment of mortar with fine recycled aggregates for 3D printing”. In : *Construction and Building Materials* Volume 367. ISSN : 0950-0618. DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2023.130313. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823000247>.

- DING, Tao, Jianzhuang XIAO, Fei QIN et Zhenhua DUAN (2020). “Mechanical behavior of 3D printed mortar with recycled sand at early ages”. In : *Construction and Building Materials* Volume 248. ISSN : 0950-0618. DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2020.118654. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820306590>.
- DING, Tao, Jianzhuang XIAO, Shuai ZOU et Yu WANG (2020). “Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand”. In : *Cement and Concrete Composites* Volume 113. ISSN : 0958-9465. DOI : 10.1016/j.cemconcomp.2020.103724. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946520302316>.
- EL CHEIKH, Khadija et Julie PIÉRARD (2022). *Impression 3D de BEtons par eXTRUSion*. [PRESENTATION (24/10/2022)].
- FEREDECO, Centre Scientifique et TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION (CSTC), Centre de RECHERCHES ROUTIÈRES (CRR) et Wallonie environnement SPW (2022). “Guide technique pour l’utilisation des granulats recyclés en Wallonie”. In : URL : <https://www.granulatsrecycles.be/guide-technique-pour-lutilisation-des-granulats-recycles-en-wallonie>.
- GUIRAUD, Patrick pour INFOCUMENTS (2018). *Notion de durabilité des bétons*. [ONLINE]. (Consulté le 18/07/2023).
- (2019). *La carbonatation, un phénomène naturel bénéfique pour le béton*. [ONLINE]. URL : <https://www.infociments.fr/ponts-et-passerelles/la-carbonatation-un-phenomene-naturel-benefique-pour-le-beton>. (Consulté le 18/07/2023).
- HAGER, Izabela, Anna GOLONKA et Roman PUTANOWICZ (2016). “3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction?” In : *Procedia Engineering* Volume 151, Pages 292-299. ISSN : 1877-7058. DOI : 10.1016/j.proeng.2016.07.357. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816317453>.
- HAMIDI, Fatemeh et Farhad ASLANI (2019). “Additive manufacturing of cementitious composites : Materials, methods, potentials, and challenges”. In : *Construction and Building Materials* Volume 218, Pages 582-609. ISSN : 0950-0618. DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.140. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819313194>.
- LI, Biao, Shaodan HOU, Zhenhua DUAN, Long LI et Wei GUO (2021). “Rheological behavior and compressive strength of concrete made with recycled fine aggregate of different size range”. In : *Construction and Building Materials* Volume 268. ISSN : 0950-0618. DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2020.121172. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820331767>.
- MUY, Y., L. COURARD, X. GARNAVULT, D. BULTEEL, M. TALEB, S. REMOND et J. HUBERT (2023). *Influence de l’utilisation de granulats fins recyclés sur les propriétés mécaniques des bétons imprimés 3D*. [21e édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton].
- MUY, Yeakleang, Julien HUBERT et Luc COURARD (2023). *Impression 3D à base de sable recyclé*. [PRESENTATION (28/03/2023)].
- MUY, Yeakleang, Julien HUBERT, Luc COURARD, Nicolas COURTOIS et David BULTEEL (2023). *CIRMAP - Mechanical characterization and modelling at hardened state for structural design*.
- NODEHI, Mehrab, Federico AGUAYO, Shahab Edin NODEHI, Aliakbar GHOLAMPOUR, Togay OZBAKKALOGLU et Osman GENCEL (2022). “Durability properties of 3D printed concrete (3DPC)”. In : *Automation in Construction* Volume 142. ISSN : 0926-5805. DOI :

- 10.1016/j.autcon.2022.104479. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522003521>.
- PARLEMENT EUROPÉEN, Actualité (2023). *Économie circulaire : définition, importance et bénéfices*. [ONLINE]. URL : <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/economy/20151201ST005603/economie-circulaire-definition-importance-et-benefices>. (Consulté le 31/05/2023).
- POLLET, V. (CSTC), B. DOOMS (CSTC) et G. MOSSELMANS (CRIC) (2007). “Corrosion des armatures induite par la carbonatation du béton : comment s’en prémunir ?” In : *Les Dossiers du CSTC* N°3. URL : https://www.buildwise.be/umbraco/surface/publicationitem/downloadfile?file=31850/fr/unprotected/cstc_artonline_2007_3_no2.pdf.
- REHMAN, Atta Ur et Jung-Hoon KIM (2021). “3D Concrete Printing : A Systematic Review of Rheology, Mix Designs, Mechanical, Microstructural, and Durability Characteristics”. In : *Materials* 14. DOI : 10.3390/ma14143800. URL : <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/14/3800>.
- ŞAHİN, Hatice Gizem et Ali MARDANI-AGHABAGLOU (2022). “Assessment of materials, design parameters and some properties of 3D printing concrete mixtures; a state-of-the-art review”. In : *Construction and Building Materials* Volume 316. ISSN : 0950-0618. DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2021.125865. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821035984>.
- SESETTI, H., M.V. LALITHYA et P.G. KUMAR (2022). “3D Concrete Printing in Construction Industry — A State of the Art”. In : *Recent Advances in Civil Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering* Volume 233, Pages 385-396. DOI : 10.1007/978-981-19-0189-8_32. URL : https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-0189-8_32.
- SIKORA, Pawel, Mateusz TECHMAN, Karol FEDEROWICZ, Ahmed M. EL-KHAYATT, H.A. SAUDI, Mohamed ABD ELRAHMAN, Marcin HOFFMANN, Dietmar STEPHAN et Sang-Yeop CHUNG (2022). “Insight into the microstructural and durability characteristics of 3D printed concrete : Cast versus printed specimens”. In : *Case Studies in Construction Materials* Volume 17. ISSN : 2214-5095. DOI : 10.1016/j.cscm.2022.e01320. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522004521>.
- SUN, Chang, Qiuyi CHEN, Jianzhuang XIAO et Weidong LIU (2020). “Utilization of waste concrete recycling materials in self-compacting concrete”. In : *Resources, Conservation and Recycling* Volume 161. ISSN : 0921-3449. DOI : 10.1016/j.resconrec.2020.104930. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920302482>.
- VALENZA, John J. et George W. SCHERER (2007). “A review of salt scaling : I. Phenomenology”. In : *Cement and Concrete Research* Volume 37, Issue 7, Pages 1007-1021. ISSN : 0008-8846. DOI : 10.1016/j.cemconres.2007.03.005. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884607000737>.
- WAN-WENDNER, Lin pour BESIX (2023). *Sustainable Construction : 3D Concrete Printing and Industrial Projects*. [PRESENTATION (28/03/2023)].
- WANG, Ruijun, Zhiyao HU, Yang LI, Kai WANG et Hao ZHANG (2022). “Review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the freeze-thaw environment”. In : *Construction and Building Materials* Volume 321. ISSN : 0950-0618. DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2022.126371. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822000654>.

- XIAO, Jianzhuang, Shuai ZOU, Ying YU, Yu WANG, Tao DING, Ying ZHU, Jiangtao YU, Shuaishuai LI, Zhenhua DUAN, Yuching WU et Lingzhi LI (2020). “3D recycled mortar printing : System development, process design, material properties and on-site printing”. In : *Journal of Building Engineering* Volume 32. ISSN : 2352-7102. DOI : 10.1016/j.jobee.2020.101779. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710220334124>.
- ZHANG, Hanghua et Jianzhuang XIAO (2021). “Plastic shrinkage and cracking of 3D printed mortar with recycled sand”. In : *Construction and Building Materials* Volume 302. ISSN : 0950-0618. DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2021.124405. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821021632>.
- ZHANG, Jingchuan, Jialiang WANG, Sufen DONG, Xun YU et Baoguo HAN (2019). “A review of the current progress and application of 3D printed concrete”. In : *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Volume 125. ISSN : 1359-835X. DOI : 10.1016/j.compositesa.2019.105533. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X19302829>.
- ZHANG, Yu, Yunsheng ZHANG, Lin YANG, Guojian LIU, Yidong CHEN, Shiwei YU et Hongjian DU (2021). “Hardened properties and durability of large-scale 3D printed cement-based materials”. In : *Materials and Structures* Volume 54. DOI : 10.1617/s11527-021-01632-x. URL : <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-021-01632-x>.
- ZHAO, Zengfeng, Sébastien REMOND, Denis DAMIDOT et Weiya XU (2015). “Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars”. In : *Construction and Building Materials* Volume 81, Pages 179-186. ISSN : 0950-0618. DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815001841>.
- ZOU, Shuai, Jianzhuang XIAO, Tao DING, Zhenhua DUAN et Qingtian ZHANG (2021). “Printability and advantages of 3D printing mortar with 100 % recycled sand”. In : *Construction and Building Materials* Volume 273. ISSN : 0950-0618. DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2020.121699. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182033703X>.
- ZOU, Shuai, Jianzhuang XIAO, Zhenhua DUAN, Tao DING et Shaodan HOU (2021). “On rheology of mortar with recycled fine aggregate for 3D printing”. In : *Construction and Building Materials* Volume 311. ISSN : 0950-0618. DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2021.125312. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821030531>.

Normes

Les normes utilisées lors des différents essais réalisés dans le cadre de ce travail de fin d'études sont les suivantes :

- NBN EN 12390-2 : Testing hardened concrete - Part 2 : Making and curing specimens for strength tests (2019)
- Note Réglementaire pour fiches techniques, notes justificatives et études préliminaires - RNR 50-1 Version 3.0 : E - Détermination de la résistance gel-dégel (2019)
- NBN EN 1015-3 : Methods of test for mortar for masonry - Part 3 : Determination of consistence of fresh mortar (by flow table) (1999)
- NBN B15 - 211 : Concrete testing - Direct tensile strength (1974)
- NF EN 196-1 : Methods of testing cement - Part 1 : Determination of strength (2016)
- NF P18-459 : Concrete - Testing hardened concrete - Testing porosity and density (2022)
- NF EN 13057 : Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of resistance of capillary absorption (2002)
- CEN/TS 12390-9 : Testing hardened concrete - Part 9 : Freeze-thaw resistance with de-icing salts - Scaling (Slab test) (2016)
- NF EN 12390-12 : Testing hardened concrete - Part 12 : Determination of the carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method (2020)

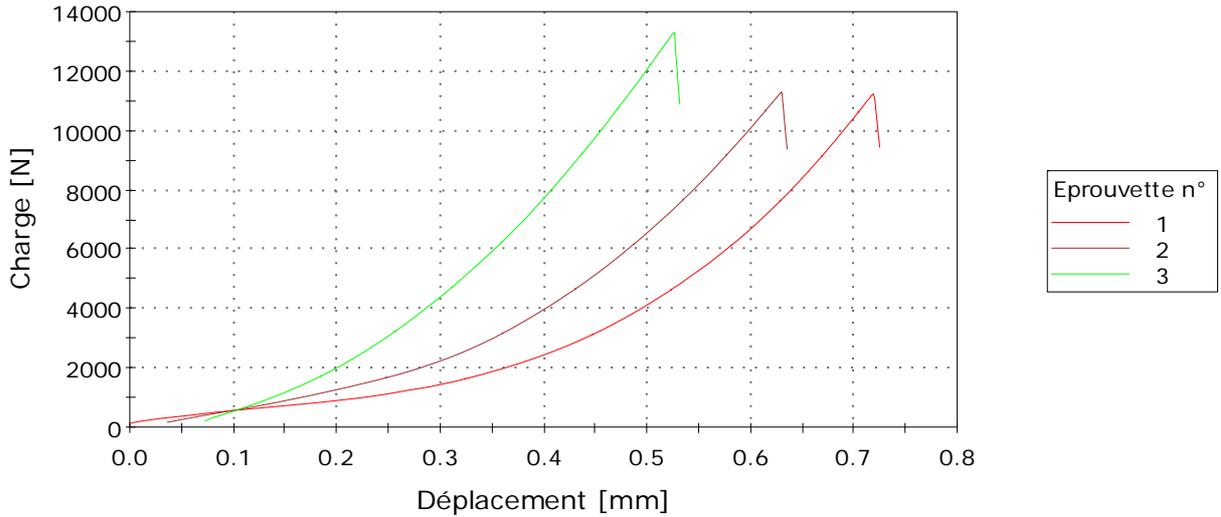
Annexes

A.1 Fiche technique du ciment CEM I 52,5 N

A.2 Résultats des essais de cisaillement pour étudier l'adhérence

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en cisaillement
Norme	-
Vitesse	0,9 kN/min
Opérateur	ADA
Date	02/05/23
Température (°C)	23
Humidité (%)	50
Etat	28j
Type	limelette

Eprouvette 1 à 3

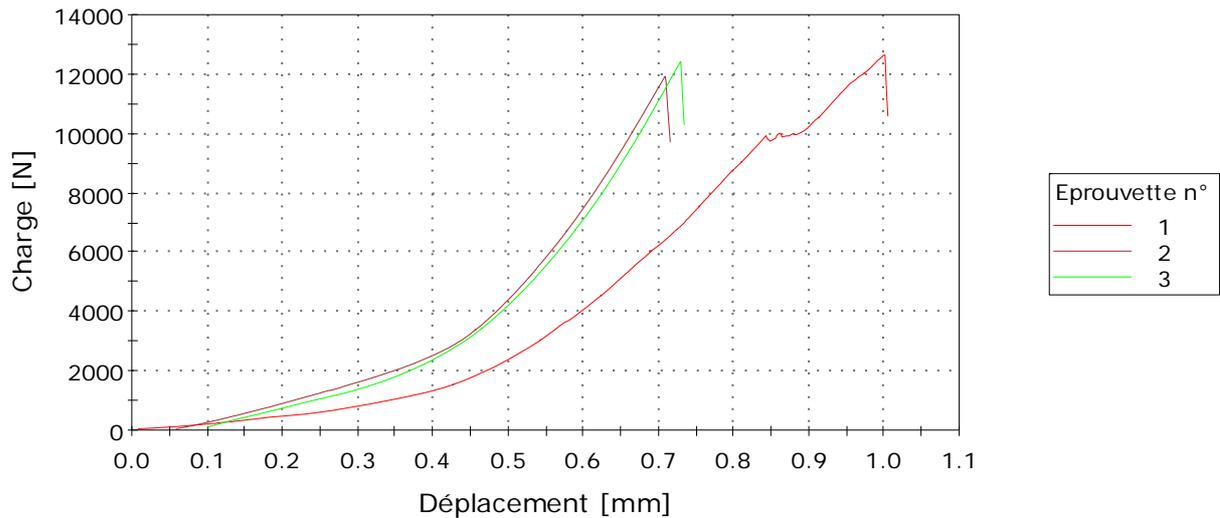


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	11241	7,03
	2	40,00	40,00	40,00	11306	7,07
	3	40,00	40,00	40,00	13294	8,31
	Moy.	40,00	40,00	40,00	11947	7,47
	E-T	0,00	0,00	0,00	1166,76	0,73

	Temps à Maximum Charge [min]	Vitesse [kN/min]
	1	12,3
	2	12,3
	3	14,5
	Moy.	13,0
	E-T	1,25

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en cisaillement
Norme	-
Vitesse	2,0 kN/min
Opérateur	ADA
Date	31/03/23
Température (°C)	23
Humidité (%)	50
Etat	56j
Type	Douai 56jours

Eprouvette 1 à 3

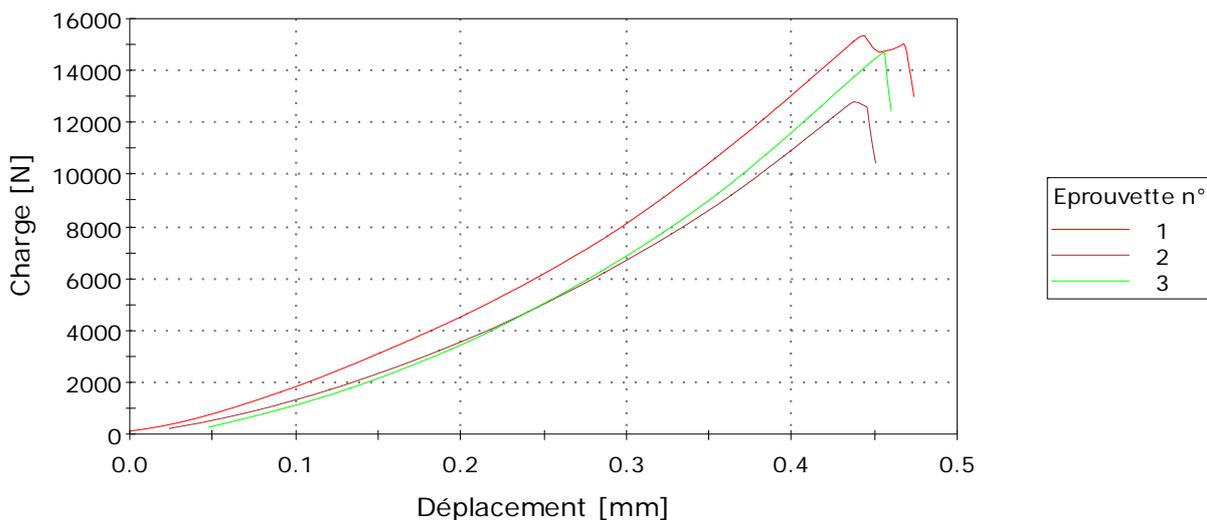


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	12651	7,91
	2	40,00	40,00	40,00	11938	7,46
	3	40,00	40,00	40,00	12426	7,77
Moy.		40,00	40,00	40,00	12338	7,71
E-T		0,00	0,00	0,00	364,25	0,23

	Temps à Maximum Charge [min]	Vitesse [kN/min]
1	14,0	0,9
2	5,9	2,0
3	6,1	2,0
Moy.	8,7	1,6
E-T	4,57	0,64

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en cisaillement
Norme	-
Vitesse	0,9 kN/min
Opérateur	YV
Date	03/05/23
Température (°C)	22,9
Humidité (%)	43,1
Etat	91 jours
Type	Douai

Eprouvette 1 à 3



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	15340	9,59
	2	40,00	40,00	40,00	12819	8,01
	3	40,00	40,00	40,00	14690	9,18
Moy.		40,00	40,00	40,00	14283	8,93
E-T		0,00	0,00	0,00	1309,06	0,82

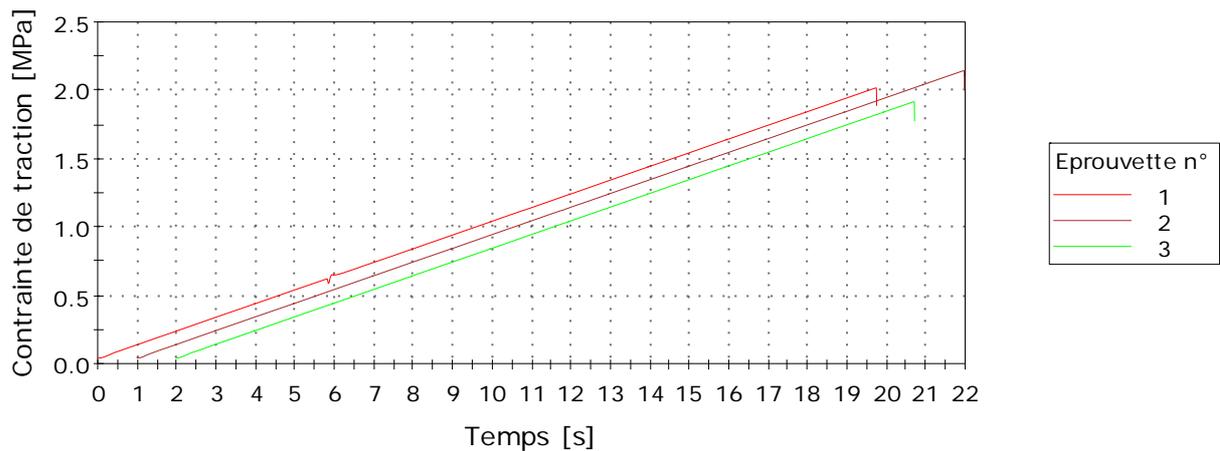
	Temps à Maximum Charge [min]	Vitesse [kN/min]
	16,8	0,9
	13,9	0,9
	15,9	0,9
Moy.	15,6	0,9
E-T	1,49	0,00

A.3 Résultats des essais de traction directe pour étudier l'adhérence

RESISTANCE A LA TRACTION DIRECTE DES BETONS

N° entrée	RT Yeakleang
Opérateur	<Aucun>
Procédure	LMC - PT - BET Traction
Norme	NBN B15 - 211 (1974)
Vitesse de mise en contrainte	0,10 MPa/s
Température [°C]	23,5
Humidité relative [%]	38,0
Cellule de mesure	10, kN

Eprouvette 1 à 3



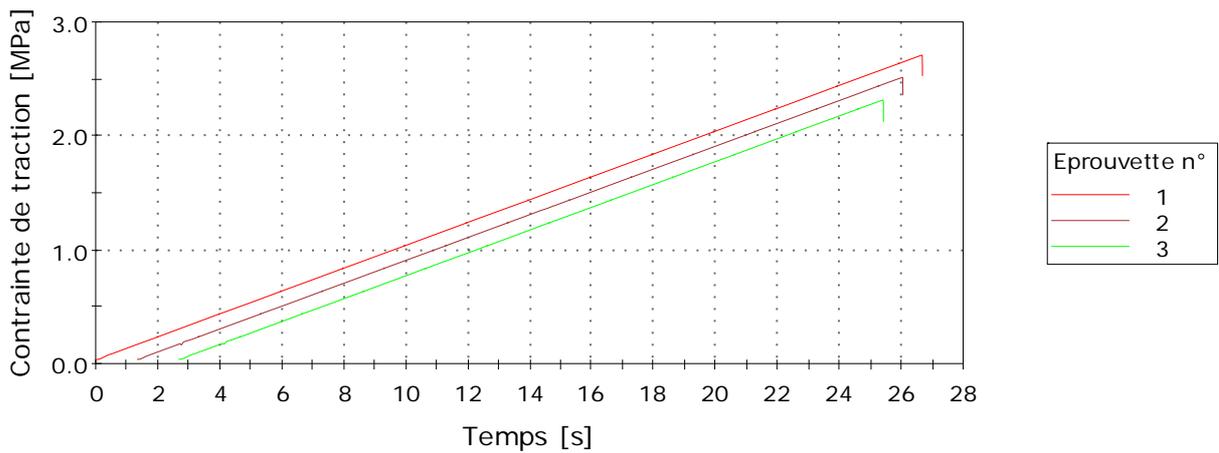
	N°	D moy. [mm]	H moy. [mm]	Char. rupt. [N]	Contr. rupt. [MPa]	Type de rupture
1	1	49,3	50,5	3856	2,0	Mortier
2	2	49,4	49,6	4111	2,1	Mortier + granulats
3	3	49,4	49,0	3678	1,9	Mortier + granulats
Moyenne		49,4	49,7	3882	2,0	
E-type		0,1	0,8	217,8	0,1	

	Remarque	Rupt. de x à y mm de la face incisée
1	28 à 34	28 à 34
2	13 à 25	13 à 25
3	18 à 30	18 à 30
Moyenne		
E-type		

RESISTANCE A LA TRACTION DIRECTE DES BETONS

N° entrée	Yeakleang Douai
Opérateur	<Aucun>
Procédure	LMC - PT - BET Traction
Norme	NBN B15 - 211 (1974)
Vitesse de mise en contrainte	0,10 MPa/s
Température [°C]	23,4
Humidité relative [%]	29,4
Cellule de mesure	10, kN

Eprouvette 1 à 3



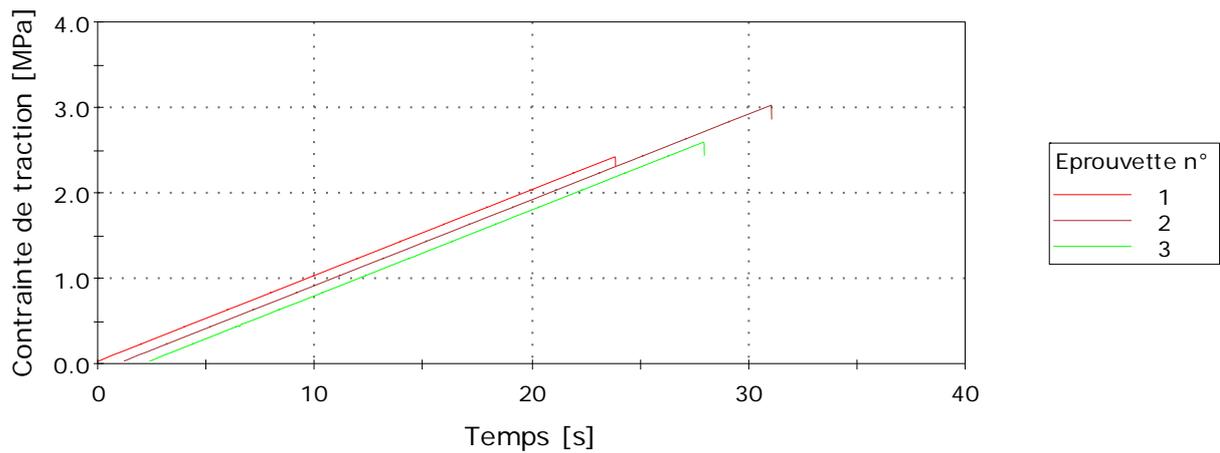
	N°	D moy. [mm]	H moy. [mm]	Char. rupt. [N]	Contr. rupt. [MPa]	Type de rupture
1	1	49,4	51,4	5195	2,7	Mortier + granulats
2	2	49,4	49,5	4821	2,5	Mortier + granulats
3	3	49,4	50,2	4442	2,3	Mortier + granulats
Moyenne		49,4	50,3	4819	2,5	
E-type		0,0	1,0	376,4	0,2	

	Remarque	Rupt. de x à y mm de la face incisée
1	de 12 à 16	
2	de 18 à 25	
3	de 18 à 27	
Moyenne		
E-type		

RESISTANCE A LA TRACTION DIRECTE DES BETONS

N° entrée	Yeakleang
Opérateur	<Aucun>
Procédure	LMC - PT - BET Traction
Norme	NBN B15 - 211 (1974)
Vitesse de mise en contrainte	0,10 MPa/s
Température [°C]	23,6
Humidité relative [%]	46,7
Cellule de mesure	10, kN

Eprouvette 1 à 3



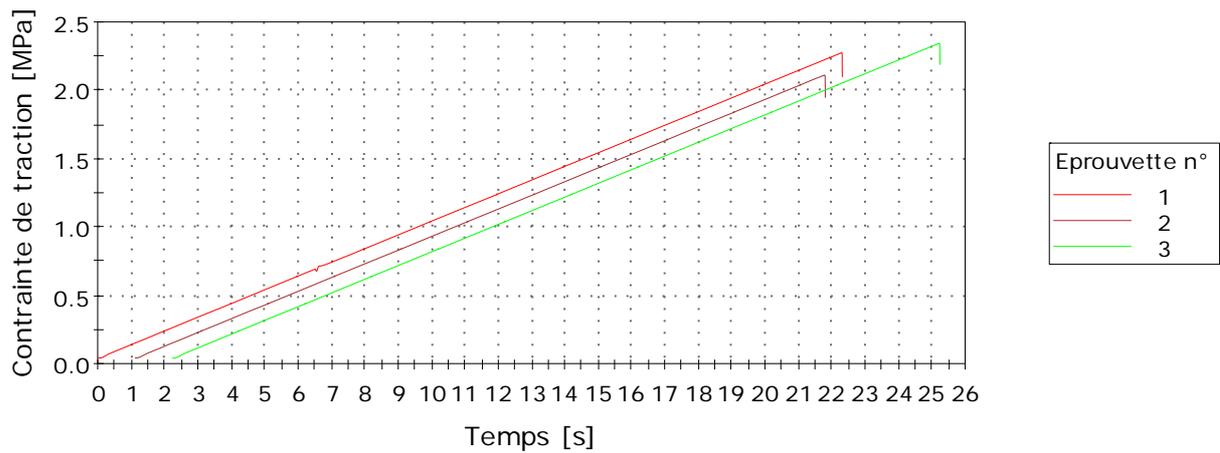
	N°	D moy. [mm]	H moy. [mm]	Char. rupt. [N]	Contr. rupt. [MPa]	Type de rupture
1	1	49,4	50,8	4651	2,4	Mortier + granulats
2	2	49,4	50,3	5811	3,0	Mortier + granulats
3	3	49,4	50,7	4984	2,6	Mortier + granulats
Moyenne		49,4	50,6	5149	2,7	
E-type		0,0	0,2	597,2	0,3	

	Remarque	Rupt. de x à y mm de la face incisée
1	17 à 28	17 à 28
2	20 à 33	20 à 33
3	23 à 33	23 à 33
Moyenne		
E-type		

RESISTANCE A LA TRACTION DIRECTE DES BETONS

N° entrée	Yeakleang
Opérateur	ADA
Procédure	LMC - PT - BET Traction
Norme	NBN B15 - 211 (1974)
Vitesse de mise en contrainte	0,10 MPa/s
Température [°C]	23,4
Humidité relative [%]	41,9
Cellule de mesure	10, kN

Eprouvette 1 à 3



	N°	D moy. [mm]	H moy. [mm]	Char. rupt. [N]	Contr. rupt. [MPa]	Type de rupture
1	1	49,5	49,9	4379	2,3	Mortier + granulats
2	2	49,5	48,2	4065	2,1	Mortier + granulats
3	3	49,5	50,2	4510	2,3	Mortier + granulats
Moyenne		49,5	49,4	4318	2,2	
E-type		0,0	1,1	228,9	0,1	

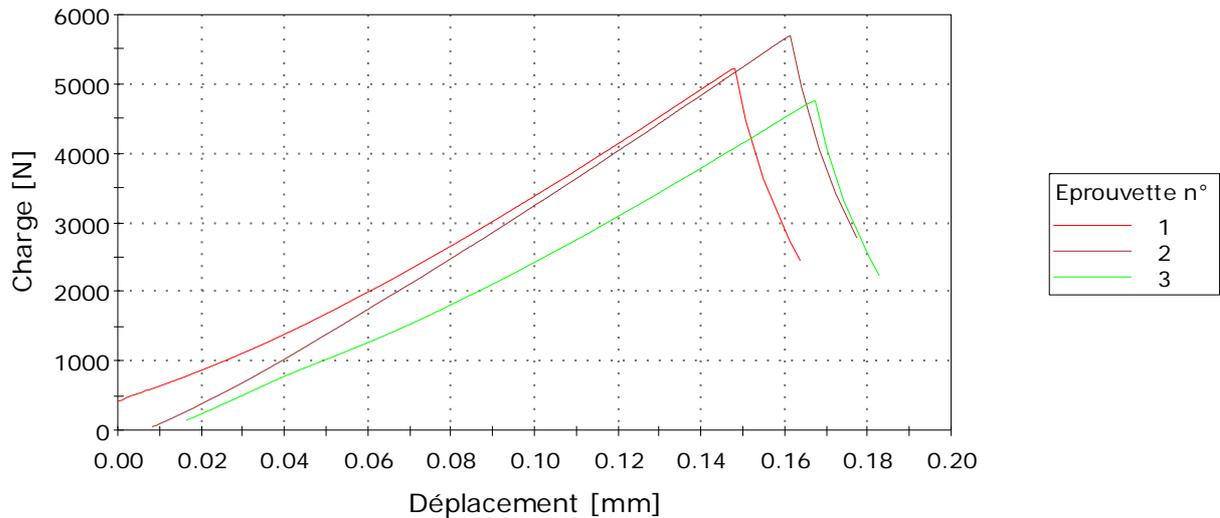
	Remarque	Rupt. de x à y mm de la face incisée
1	26 à 32	26 à 32
2	17 à 31	17 à 31
3	19 à 27	19 à 27
Moyenne		
E-type		

A.4 Résultats des essais de flexion

A.4.1 Échantillons moulés, sable naturel

Rapport n°	Yeakleang
Date	28-10-22
Opérateur	ADA
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,00 mm
Température (°C)	23
Humidité relative (%)	50
Type	BV2
Etat	2 jours

Eprouvette 1 à 3

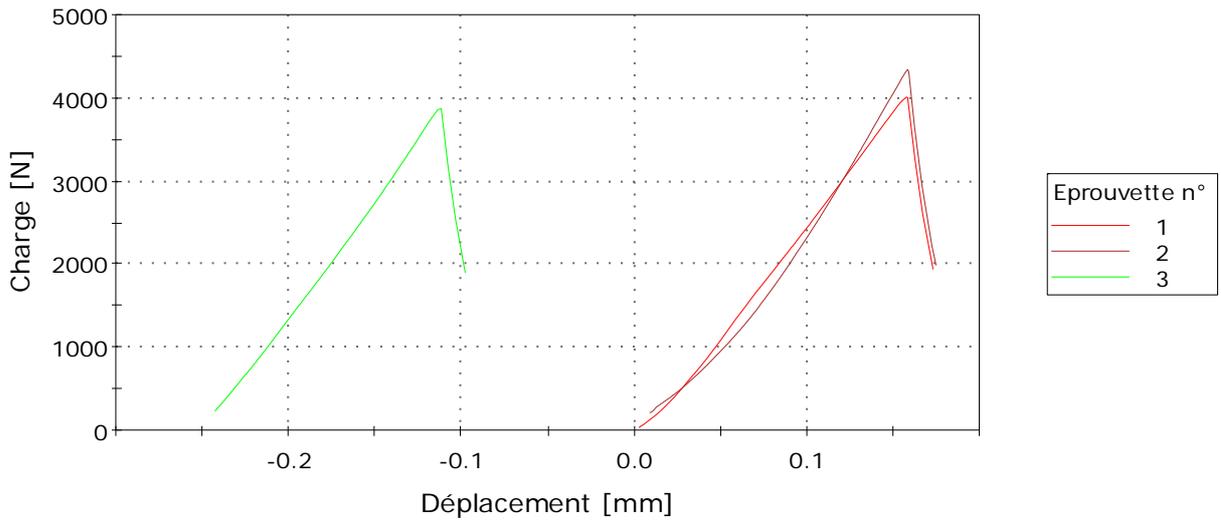


	N°	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	40,41	40,01	574,82	5221,2	12,11
	2	40,72	40,01	578,26	5692,6	13,10
	3	40,51	40,11	576,08	4760,1	10,96
Moyenne		40,55	40,04	576,39	5224,7	12,05
Ecart-type		0,2	0,1	1,7	466,3	1,1

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	12,23	2222
2	13,33	2218
3	11,06	2216
Moyenne	12,21	2219
Ecart-type	1,1	3,1

Rapport n°	Yeakleang
Date	14/11/22
Opérateur	ADA
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,00 mm
Température (°C)	23
Humidité relative (%)	50
Type	BV 5
Etat	7 jours

Eprouvette 1 à 3

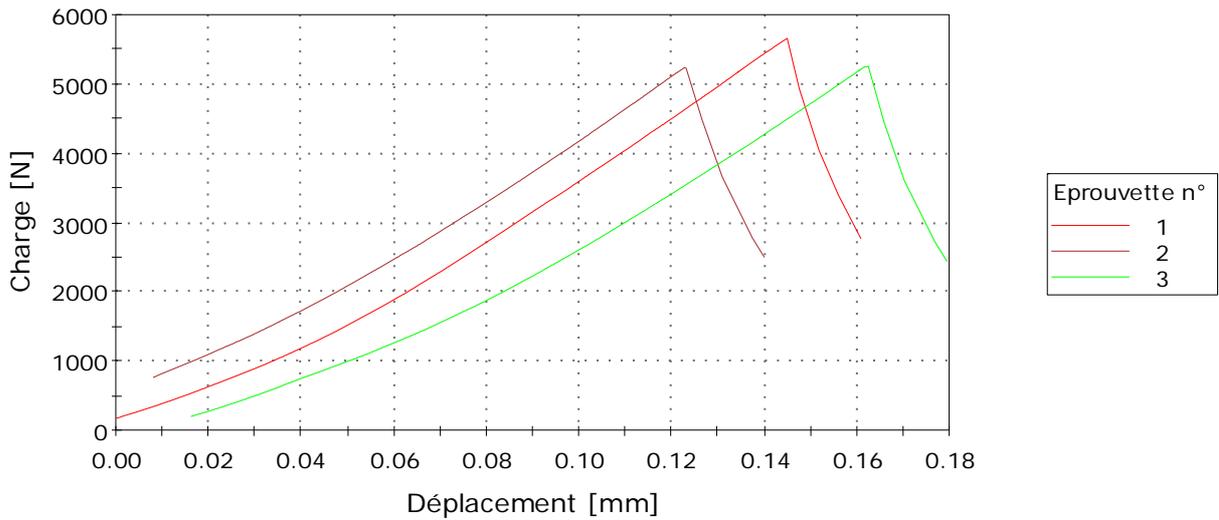


	N°	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	40,70	40,16	571,25	4010,7	9,16
	2	41,18	40,03	572,55	4341,4	9,87
	3	40,57	40,19	575,85	3870,6	8,86
Moyenne		40,82	40,13	573,22	4074,2	9,30
Ecart-type		0,3	0,1	2,4	241,7	0,5

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	9,29	2184
2	10,15	2171
3	8,94	2207
Moyenne	9,46	2187
Ecart-type	0,6	18,5

Rapport n°	Yeakleang
Date	17/11/22
Opérateur	ADA
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,00 mm
Température (°C)	23
Humidité relative (%)	50
Type	BV 1
Etat	28 jours

Eprouvette 1 à 3

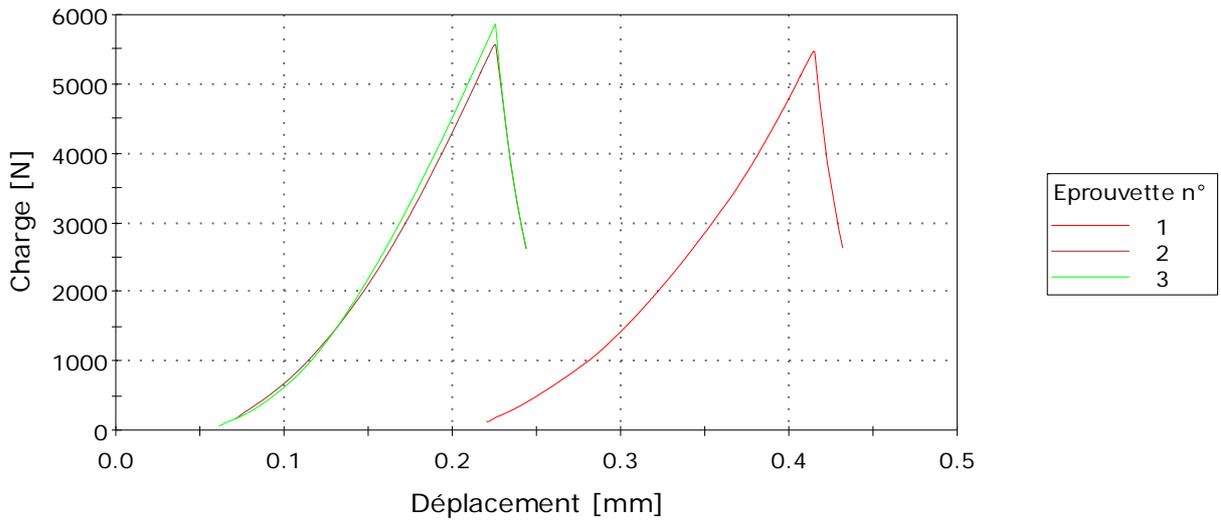


	N°	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	40,66	40,20	589,46	5663,5	12,93
	2	40,36	40,01	583,70	5235,1	12,15
	3	40,45	40,13	576,84	5256,1	12,10
Moyenne		40,49	40,11	583,33	5384,9	12,40
Ecart-type		0,2	0,1	6,3	241,5	0,5

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	13,08	2254
2	12,26	2259
3	12,20	2221
Moyenne	12,51	2245
Ecart-type	0,5	20,7

Rapport n°	Yeakleang
Date	21/12/22
Opérateur	YV
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,00 mm
Température (°C)	20,1
Humidité relative (%)	51,1
Type	BV3
Etat	56 jours

Eprouvette 1 à 3

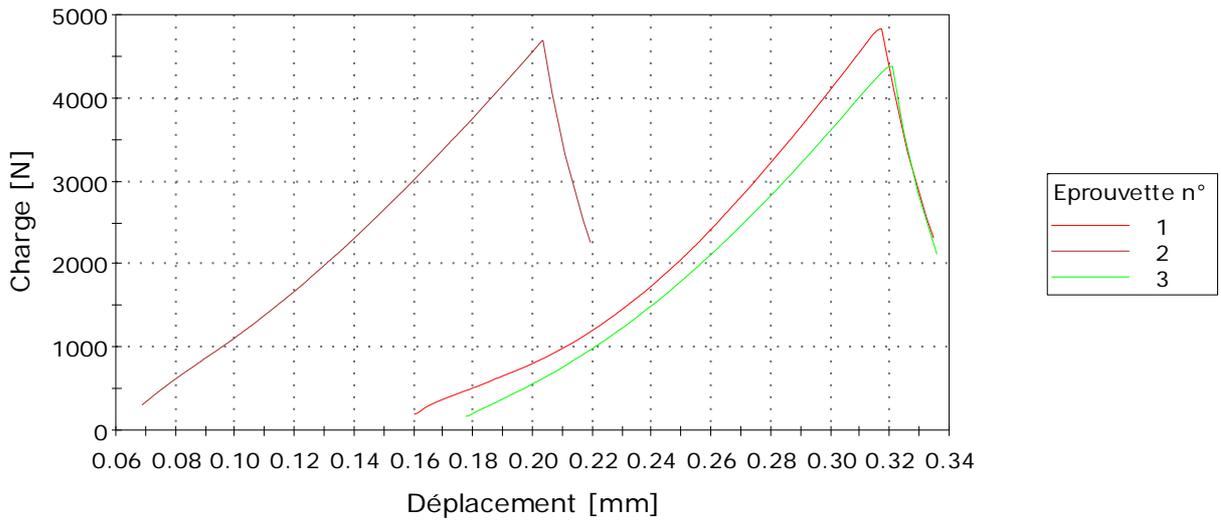


	N°	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	40,82	40,07	589,96	5478,8	12,54
	2	40,93	39,91	588,21	5570,5	12,82
	3	41,02	40,16	593,26	5868,3	13,31
Moyenne		40,92	40,05	590,48	5639,2	12,89
Ecart-type		0,1	0,1	2,6	203,6	0,4

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	12,77	2254
2	13,14	2251
3	13,59	2251
Moyenne	13,17	2252
Ecart-type	0,4	2,1

Rapport n°	Yeakleang
Date	24/01/23
Opérateur	YV
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,00 mm
Température (°C)	23,3
Humidité relative (%)	27,9
Type	BV4
Etat	90 jours

Eprouvette 1 à 3



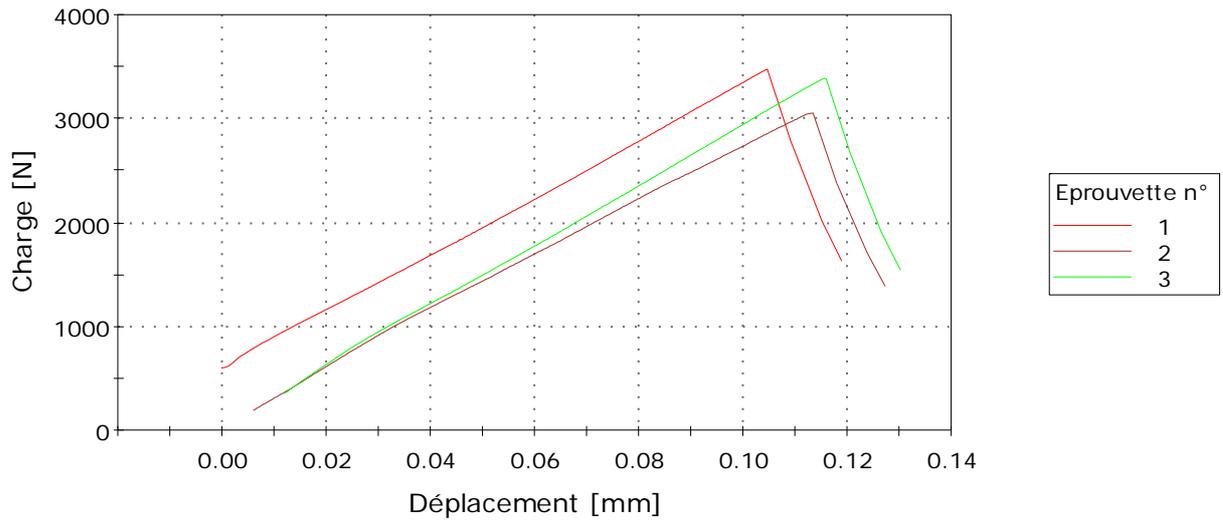
	N°	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	40,51	40,13	579,14	4829,6	11,10
	2	40,43	40,00	585,59	4689,6	10,87
	3	40,47	40,15	583,36	4380,3	10,07
Moyenne		40,47	40,09	582,70	4633,2	10,68
Ecart-type		0,0	0,1	3,3	229,9	0,5

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	11,21	2227
2	10,99	2263
3	10,15	2244
Moyenne	10,78	2245
Ecart-type	0,6	18,3

A.4.2 Échantillons moulés, sable recyclé

Rapport n°	RF 2 jours
Date	17-06-22
Opérateur	LH
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,00 mm
Température (°C)	23,9
Humidité relative (%)	46,6
Type	TV2
Etat	2 jours

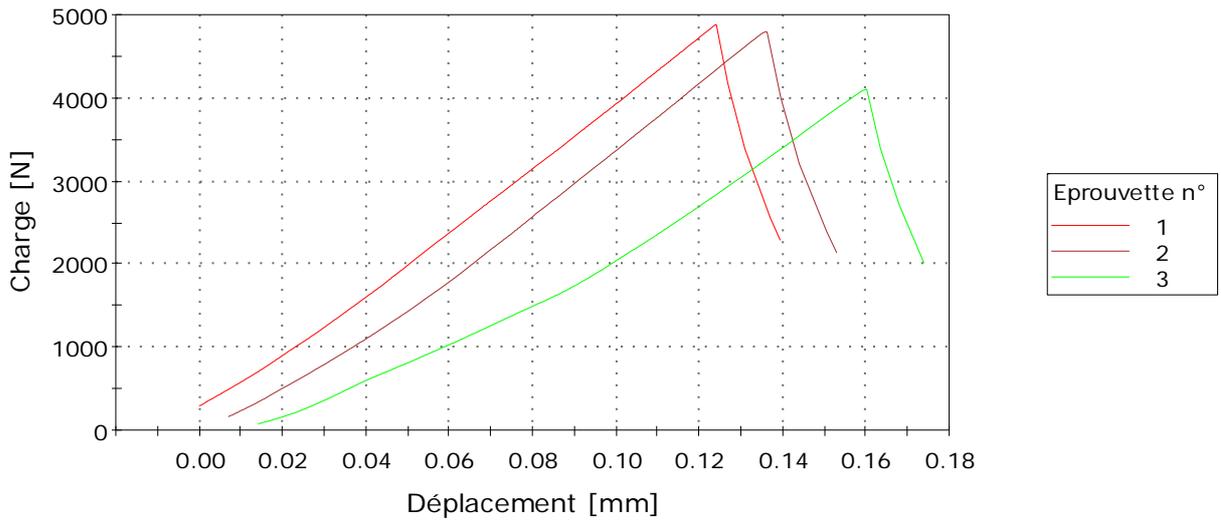
Eprouvette 1 à 3



	N°	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	1	40,63	40,14	570,98	3475,4	7,96	2188
2	2	40,74	40,02	566,42	3056,5	7,03	2171
3	3	40,53	40,01	565,81	3386,7	7,83	2181
Moyenne		40,63	40,06	567,74	3306,2	7,61	2180
Ecart-type		0,1	0,1	2,8	220,7	0,5	8,4

Rapport n°	Yeakleang
Date	30-06-22
Opérateur	ADA
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,00 mm
Température (°C)	23,8
Humidité relative (%)	51,8
Type	tv7
Etat	7 jours

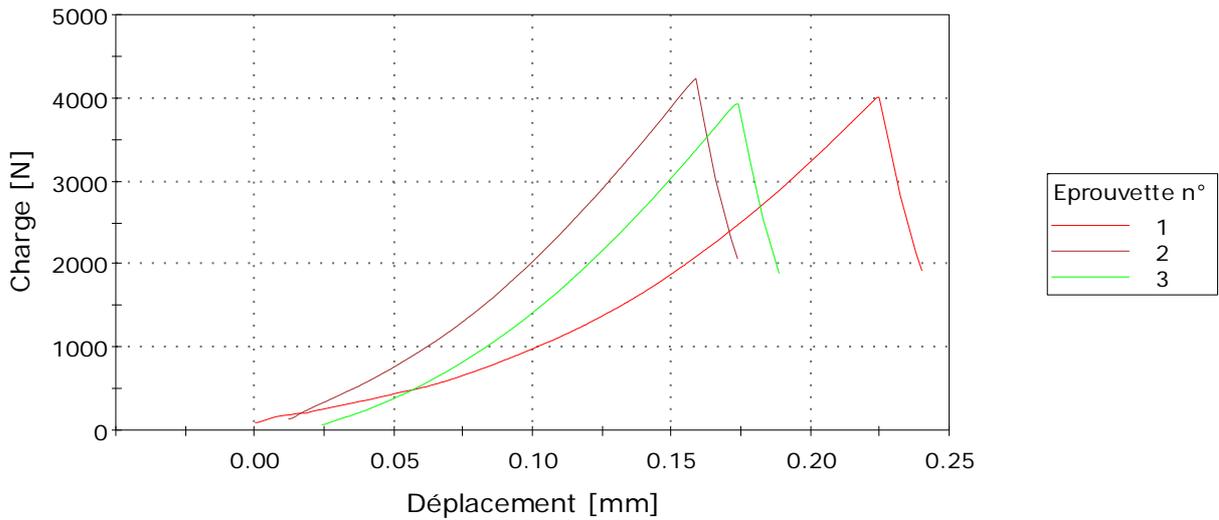
Eprouvette 1 à 3



	N°	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	1	40,65	40,07	566,17	4877,6	11,21	2172
2	2	40,68	40,02	562,93	4792,7	11,03	2161
3	3	40,50	40,43	563,93	4105,2	9,30	2153
Moyenne		40,61	40,17	564,34	4591,9	10,52	2162
Ecart-type		0,1	0,2	1,7	423,6	1,1	10,0

Rapport n°	Yeakleang
Date	13/07/22
Opérateur	YV
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,00 mm
Température (°C)	23,8
Humidité relative (%)	49,2
Type	TV28_2
Etat	28 jours

Eprouvette 1 à 3

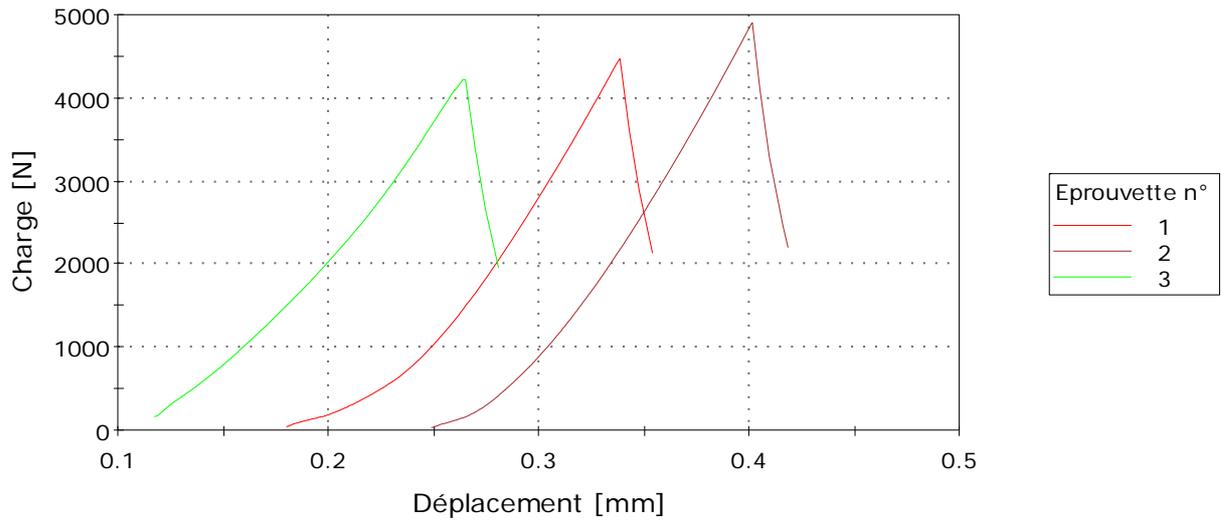


	N°	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	40,55	40,13	568,35	4010,1	9,21
	2	40,74	40,06	567,86	4233,5	9,71
	3	40,37	40,03	568,80	3929,5	9,11
Moyenne		40,55	40,07	568,34	4057,7	9,35
Ecart-type		0,2	0,1	0,5	157,5	0,3

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	9,31	2183
2	9,88	2175
3	9,19	2200
Moyenne	9,46	2186
Ecart-type	0,4	12,9

Rapport n°	Yeakleang
Date	18/08/22
Opérateur	YV
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,00 mm
Température (°C)	23,4
Humidité relative (%)	54,2
Type	tv 56
Etat	56 jours

Eprouvette 1 à 3

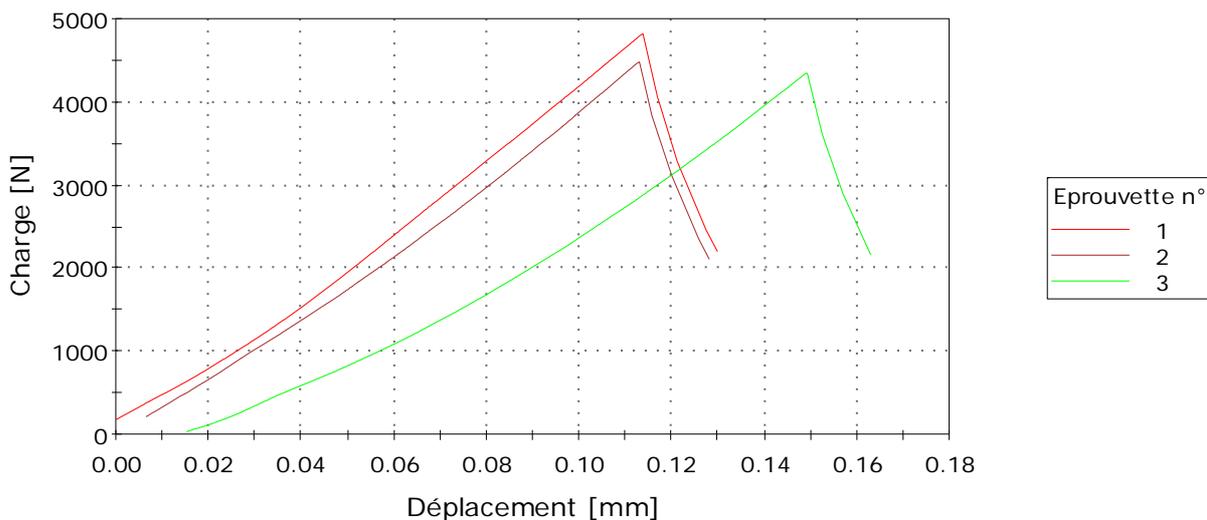


	N°	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	40,81	40,17	576,79	4470,4	10,18
	2	41,25	40,09	576,65	4902,2	11,09
	3	40,94	40,18	575,23	4224,7	9,59
Moyenne		41,00	40,15	576,22	4532,4	10,29
Ecart-type		0,2	0,0	0,9	343,0	0,8

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	10,34	2199
2	11,41	2179
3	9,77	2186
Moyenne	10,51	2188
Ecart-type	0,8	10,0

Rapport n°	Yeakleang
Date	25/10/22
Opérateur	ADA
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,00 mm
Température (°C)	23
Humidité relative (%)	50
Type	Tv 56
Etat	56 jours

Eprouvette 1 à 3



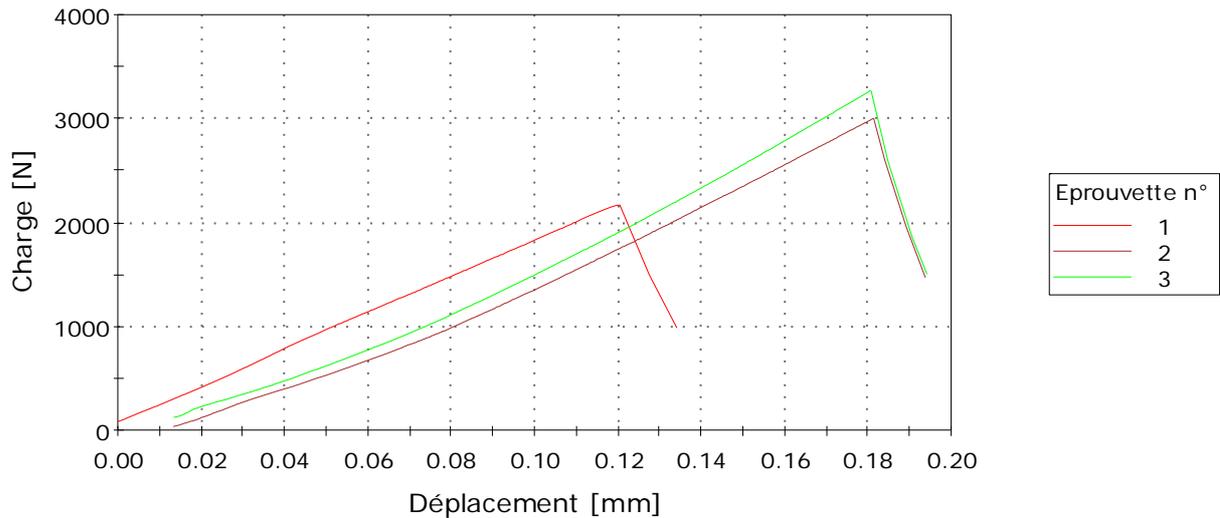
	N°	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	40,90	40,24	574,46	4817,4	10,91
	2	40,81	40,01	569,37	4479,0	10,28
	3	40,51	40,34	568,24	4347,0	9,89
Moyenne		40,74	40,20	570,69	4547,8	10,36
Ecart-type		0,2	0,2	3,3	242,6	0,5

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	11,09	2182
2	10,49	2179
3	9,93	2173
Moyenne	10,50	2178
Ecart-type	0,6	4,3

A.4.3 Échantillons imprimés, sable recyclé, testés dans le sens de pose

Rapport n°	Yeakleang
Date	03/02/23
Opérateur	ADA
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	23,3
Humidité relative (%)	41,8
Type	sens de pose
Etat	2 jours

Eprouvette 1 à 3

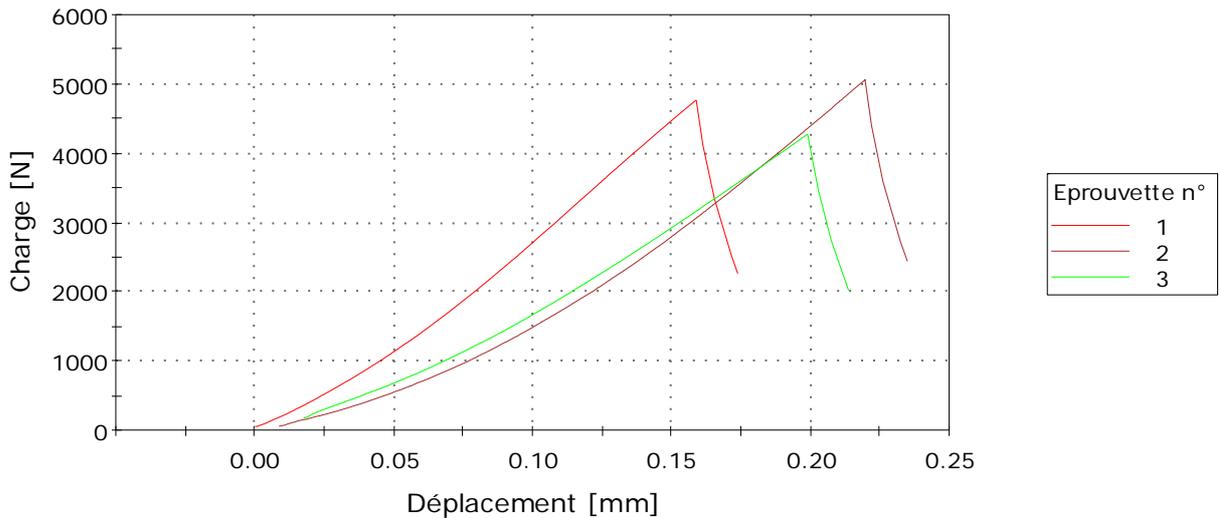


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]
1	1	160,0	40,1	39,9	551,35	2172,5
2	2	161,7	40,6	40,5	570,72	3003,6
3	3	160,7	40,4	40,4	568,41	3269,1
Moyenne		160,8	40,4	40,3	563,49	2815,1
Ecart-type		0,9	0,3	0,3	10,6	572,1

	Contrainte Max [N/mm ²]	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	5,10	5,13	2154
2	6,77	6,78	2147
3	7,44	7,44	2167
Moyenne	6,44	6,45	2156
Ecart-type	1,2	1,2	10,5

Rapport n°	Yeakleang
Date	08/02/23
Opérateur	YV
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	23,4
Humidité relative (%)	37,9
Type	sens de la pose
Etat	7 jours

Eprouvette 1 à 3

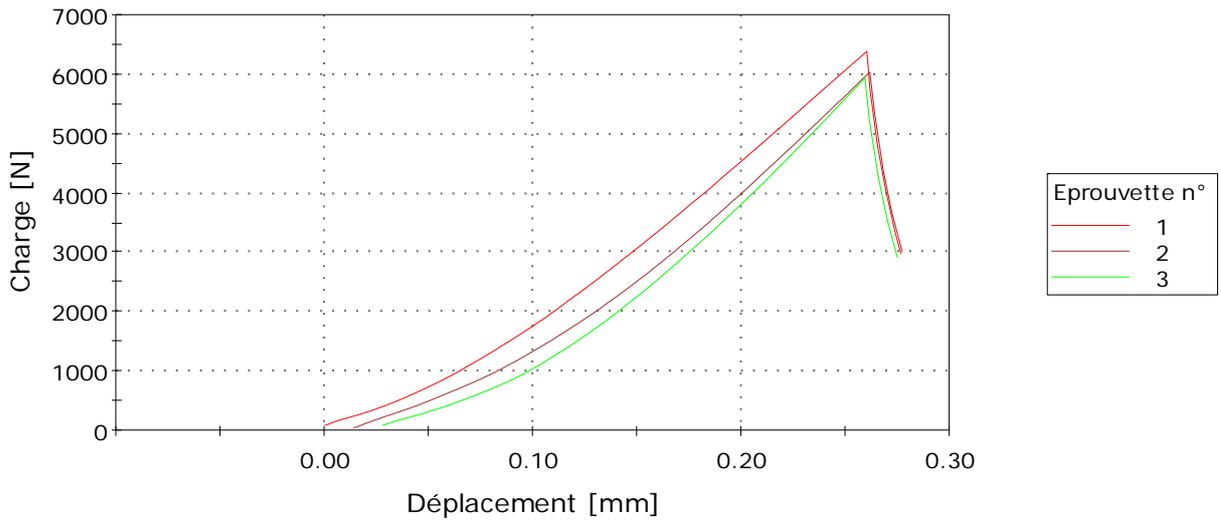


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	160,2	39,9	39,8	527,02	4769,5	11,31
	2	159,3	39,9	39,8	540,88	5058,1	11,98
	3	159,4	39,6	39,7	537,10	4278,0	10,32
Moyenne		159,6	39,8	39,8	535,00	4701,8	11,20
Ecart-type		0,5	0,2	0,1	7,2	394,4	0,8

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	11,33	2070
2	11,99	2136
3	10,29	2148
Moyenne	11,20	2118
Ecart-type	0,9	42,3

Rapport n°	Yeakleang
Date	01/03/23
Opérateur	YV
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	23,4
Humidité relative (%)	27,8
Type	sens de pose
Etat	28 jours

Eprouvette 1 à 3

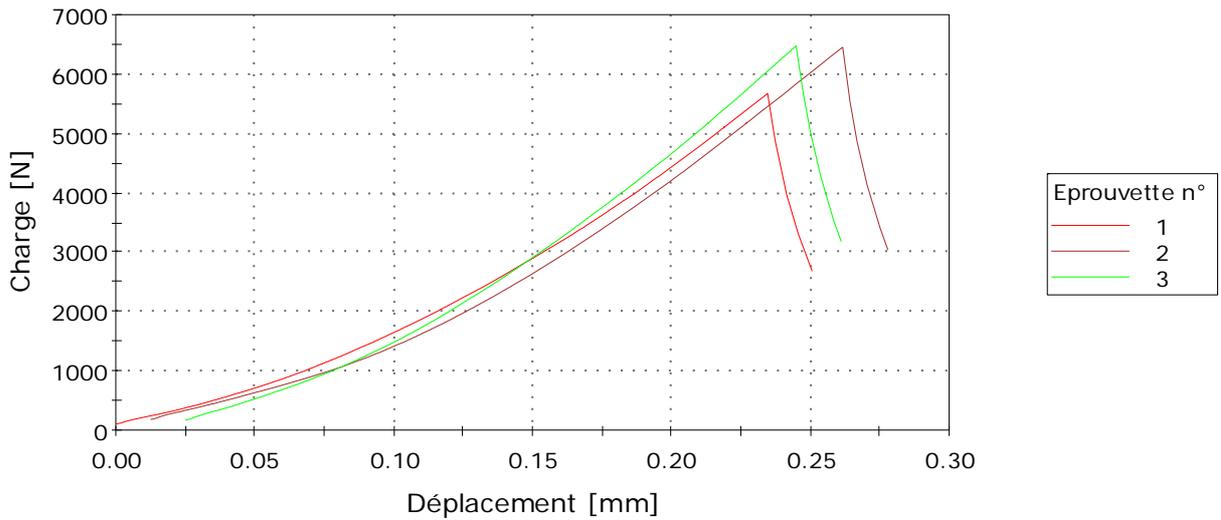


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	159,1	40,9	40,9	568,84	6386,5	13,97
	2	159,4	40,9	40,8	572,07	6040,3	13,31
	3	159,4	40,0	40,8	560,83	5934,4	13,33
Moyenne		159,3	40,6	40,8	567,25	6120,4	13,54
Ecart-type		0,2	0,5	0,1	5,8	236,4	0,4

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	13,97	2133
2	13,37	2150
3	13,07	2151
Moyenne	13,47	2145
Ecart-type	0,5	9,9

Rapport n°	Yeakleang
Date	29/03/23
Opérateur	YV
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	23,4
Humidité relative (%)	46,6
Type	sens de pose
Etat	56 jours

Eprouvette 1 à 3



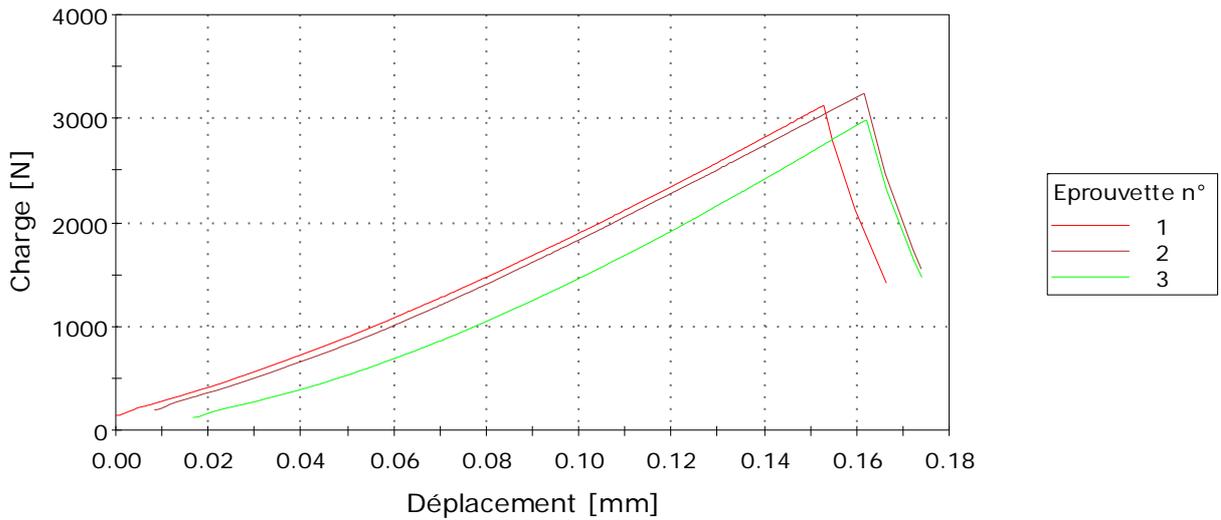
	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	160,2	40,8	40,8	574,14	5682,8	12,54
	2	159,6	41,4	41,0	583,21	6451,0	13,92
	3	160,1	40,7	40,7	571,09	6476,0	14,39
Moyenne		160,0	40,9	40,8	576,15	6203,3	13,62
Ecart-type		0,3	0,4	0,1	6,3	450,9	1,0

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	12,51	2153
2	14,07	2154
3	14,38	2153
Moyenne	13,65	2153
Ecart-type	1,0	0,8

A.4.4 Échantillons imprimés, sable recyclé, testés dans le sens perpendiculaire à la pose

Rapport n°	Yeakleang
Date	03/02/23
Opérateur	ADA
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	23,3
Humidité relative (%)	41,8
Type	sens perpendiculaire à la pose
Etat	2 jours

Eprouvette 1 à 3

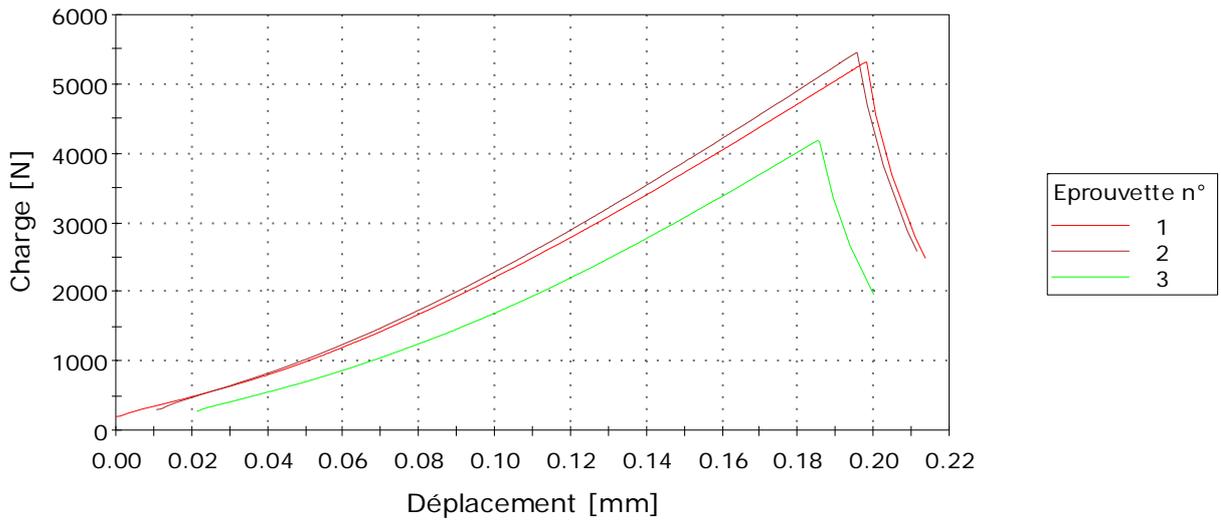


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]
	1	A	161,6	40,8	576,05	3129,7
	2	B	161,5	40,9	572,98	3242,6
	3	C	160,9	40,5	569,44	2985,0
Moyenne			161,3	40,7	572,82	3119,1
Ecart-type			0,4	0,2	3,3	129,1

	Contrainte Max [N/mm ²]	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	6,98	7,01	2152
2	7,29	7,38	2147
3	6,74	6,74	2158
Moyenne	7,00	7,04	2152
Ecart-type	0,3	0,3	5,3

Rapport n°	Yeakleang
Date	08/02/23
Opérateur	YV
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	23,4
Humidité relative (%)	39,1
Type	sens perpendiculaire à la pose
Etat	7 jours

Eprouvette 1 à 3

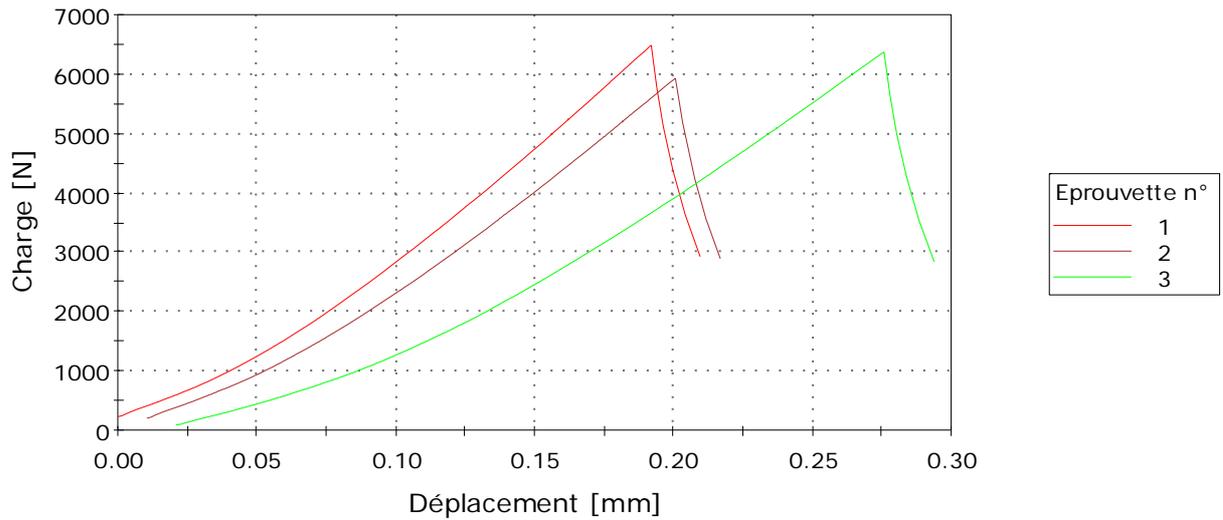


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]	
	1	4	159,5	40,3	40,2	562,32	5315,7	12,21
	2	5	159,3	40,4	40,5	561,91	5452,9	12,32
	3	6	159,8	40,7	40,1	549,50	4191,0	9,59
Moyenne			159,5	40,5	40,3	557,91	4986,6	11,37
Ecart-type			0,3	0,2	0,2	7,3	692,4	1,5

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	12,24	2172
2	12,29	2153
3	9,74	2105
Moyenne	11,42	2143
Ecart-type	1,5	34,8

Rapport n°	Yeakleang
Date	01/03/23
Opérateur	YV
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	23,6
Humidité relative (%)	27,1
Type	sens perpendiculaire à la pose
Etat	28 jours

Eprouvette 1 à 3

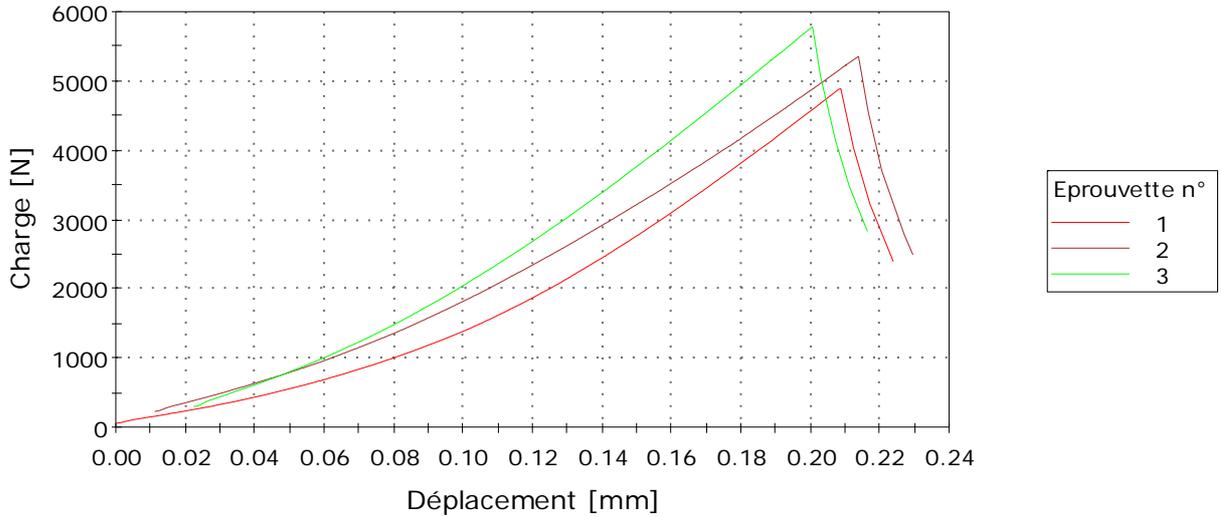


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]	
	1	4	159,4	40,8	40,8	578,26	6485,0	14,33
	2	5	159,1	40,8	40,8	572,78	5934,2	13,08
	3	6	159,6	40,8	40,8	575,25	6370,9	14,06
Moyenne			159,4	40,8	40,8	575,43	6263,4	13,82
Ecart-type			0,2	0,0	0,0	2,7	290,7	0,7

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	14,33	2179
2	13,06	2161
3	14,06	2164
Moyenne	13,82	2168
Ecart-type	0,7	9,6

Rapport n°	Yeakleang
Date	29/03/23
Opérateur	YV
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	23,6
Humidité relative (%)	47,5
Type	sens perpendiculaire à la pose
Etat	56 jours

Eprouvette 1 à 3



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	159,5	40,8	40,8	570,15	4889,5	10,80
	2	159,5	40,7	40,3	561,72	5353,9	12,17
	3	160,1	40,9	40,9	575,62	5777,2	12,69
Moyenne		159,7	40,8	40,6	569,16	5340,2	11,89
Ecart-type		0,4	0,1	0,3	7,0	444,0	1,0

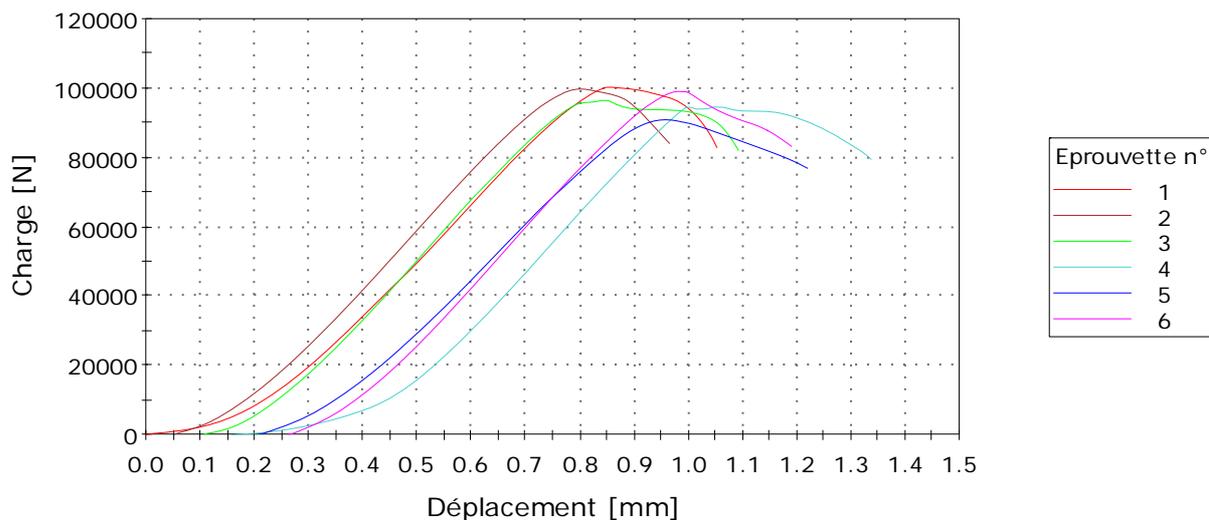
	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	10,81	2147
2	12,29	2150
3	12,69	2152
Moyenne	11,93	2150
Ecart-type	1,0	2,5

A.5 Résultats des essais de compression

A.5.1 Échantillons moulés, sable naturel

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	ADA
Date	28/10/22
Température (°C)	23
Humidité (%)	50
Etat	2 jours
Type	BV2

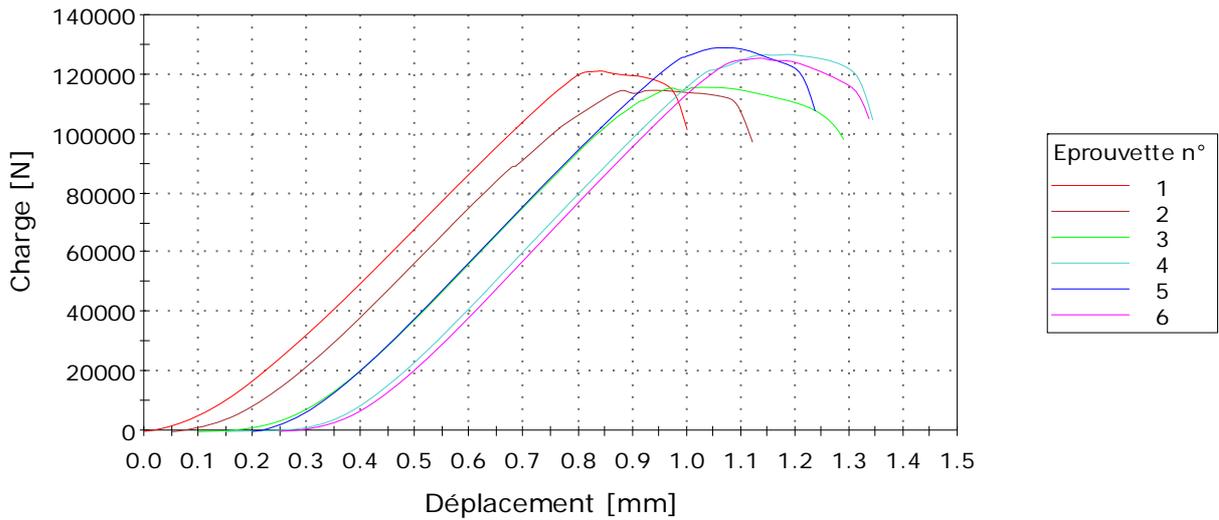
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	100324	62,70
	2	40,00	40,00	40,00	99769	62,36
	3	40,00	40,00	40,00	96500	60,31
	4	40,00	40,00	40,00	94605	59,13
	5	40,00	40,00	40,00	90873	56,80
	6	40,00	40,00	40,00	99055	61,91
	Moy.	40,00	40,00	40,00	96855	60,53
	E-T	0,00	0,00	0,00	3642,51	2,28

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	ADA
Date	14/11/22
Température (°C)	23
Humidité (%)	50
Etat	7 jours
Type	BV 5

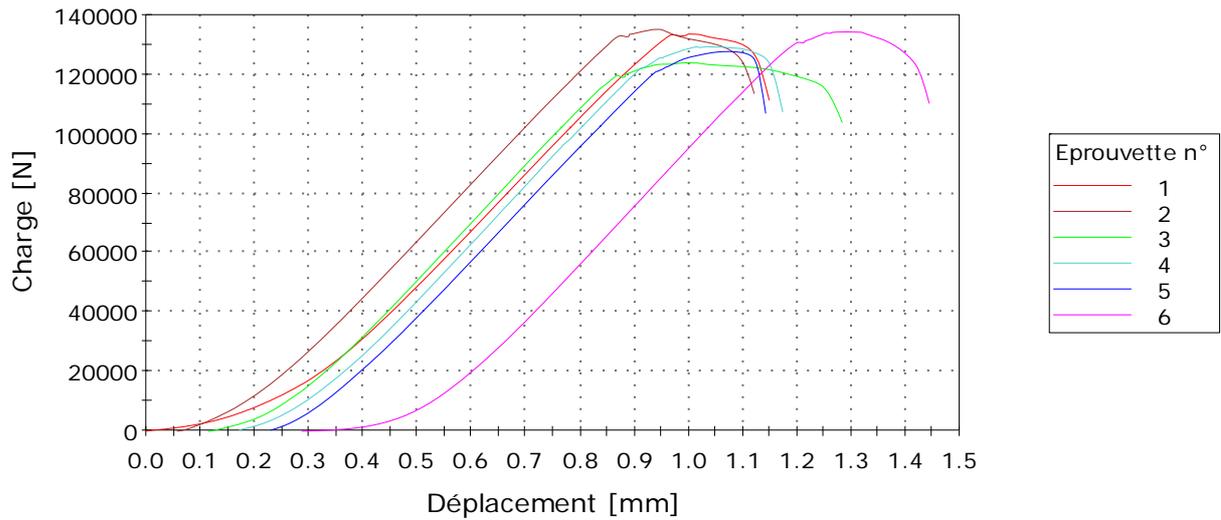
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	121109	75,69
	2	40,00	40,00	40,00	114579	71,61
	3	40,00	40,00	40,00	115610	72,26
	4	40,00	40,00	40,00	126682	79,18
	5	40,00	40,00	40,00	128901	80,56
	6	40,00	40,00	40,00	125355	78,35
	Moy.	40,00	40,00	40,00	122040	76,27
	E-T	0,00	0,00	0,00	5958,00	3,72

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	ADA
Date	17/11/22
Température (°C)	23
Humidité (%)	50
Etat	28 jours
Type	BV 1 20-10-22

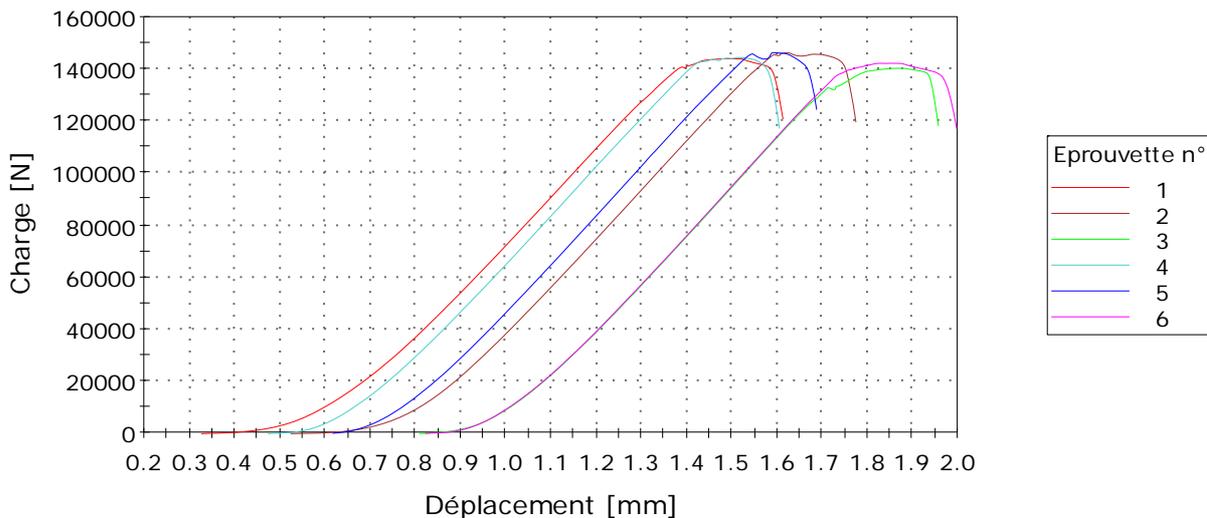
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	133512	83,45
	2	40,00	40,00	40,00	135050	84,41
	3	40,00	40,00	40,00	123833	77,40
	4	40,00	40,00	40,00	129291	80,81
	5	40,00	40,00	40,00	127568	79,73
	6	40,00	40,00	40,00	134198	83,87
	Moy.	40,00	40,00	40,00	130575	81,61
	E-T	0,00	0,00	0,00	4425,42	2,77

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	YV
Date	21/12/22
Température (°C)	20,3
Humidité (%)	50,4
Etat	56 jours
Type	BV3

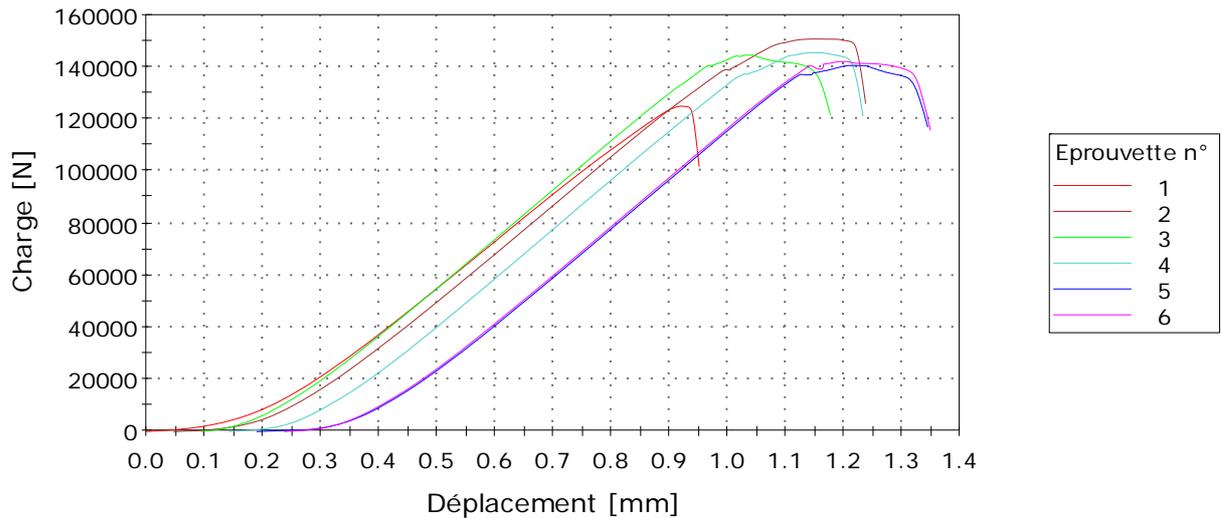
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	143864	89,91
	2	40,00	40,00	40,00	146178	91,36
	3	40,00	40,00	40,00	140159	87,60
	4	40,00	40,00	40,00	144249	90,16
	5	40,00	40,00	40,00	146228	91,39
	6	40,00	40,00	40,00	142089	88,81
Moy.		40,00	40,00	40,00	143794	89,87
E-T		0,00	0,00	0,00	2363,94	1,48

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	YV
Date	24/01/23
Température (°C)	23,4
Humidité (%)	27,9
Etat	90 jours
Type	BV4

Eprouvette 1 à 6

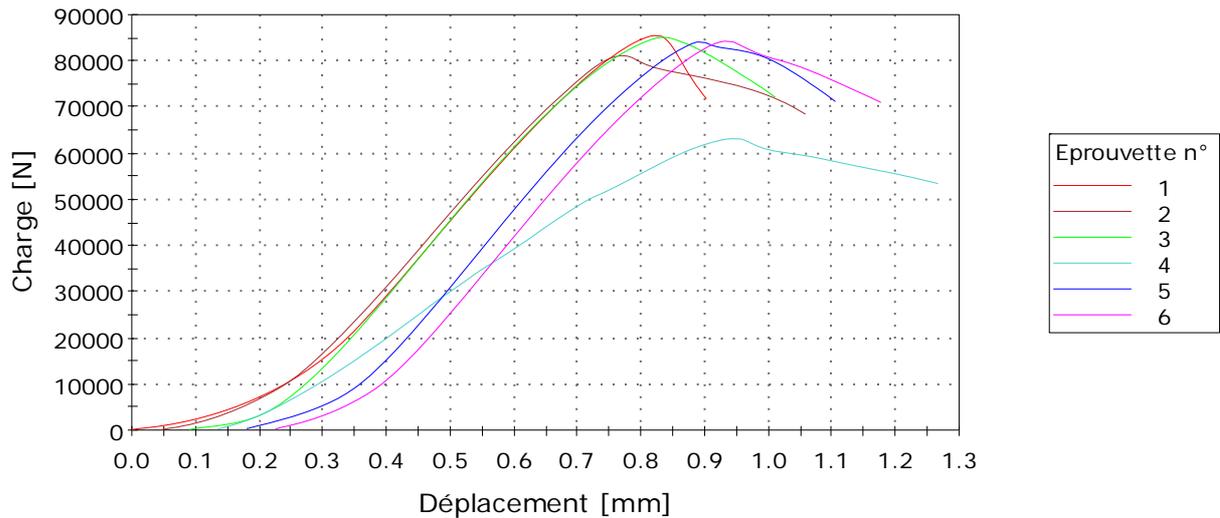


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	124855	78,03
	2	40,00	40,00	40,00	150656	94,16
	3	40,00	40,00	40,00	144537	90,34
	4	40,00	40,00	40,00	145441	90,90
	5	40,00	40,00	40,00	140503	87,81
	6	40,00	40,00	40,00	141968	88,73
Moy.		40,00	40,00	40,00	141327	88,33
E-T		0,00	0,00	0,00	8794,21	5,50

A.5.2 Échantillons moulés, sable recyclé

N° Rapport	LEANG
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	LH
Date	17-06-22
Température (°C)	23,8
Humidité (%)	47,4
Etat	2 jours
Type	TV2

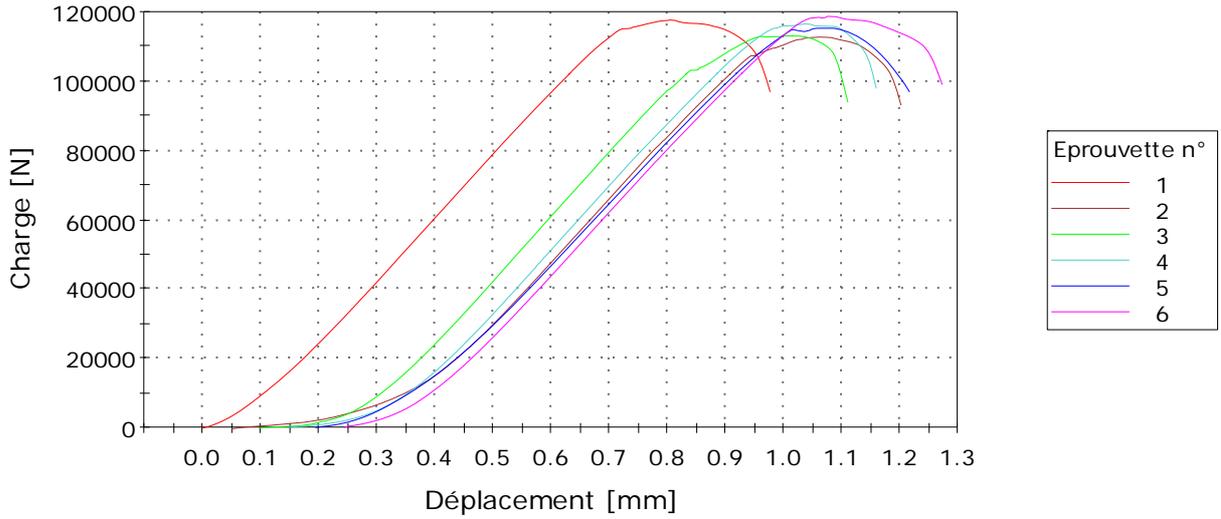
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	85474	53,42
	2	40,00	40,00	40,00	81130	50,71
	3	40,00	40,00	40,00	85098	53,19
	4	40,00	40,00	40,00	63251	39,53
	5	40,00	40,00	40,00	84087	52,55
	6	40,00	40,00	40,00	84254	52,66
Moy.		40,00	40,00	40,00	80549	50,34
E-T		0,00	0,00	0,00	8611,02	5,38

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	ADA
Date	30/06/22
Température (°C)	23,8
Humidité (%)	51,8
Etat	7 jours
Type	tv7

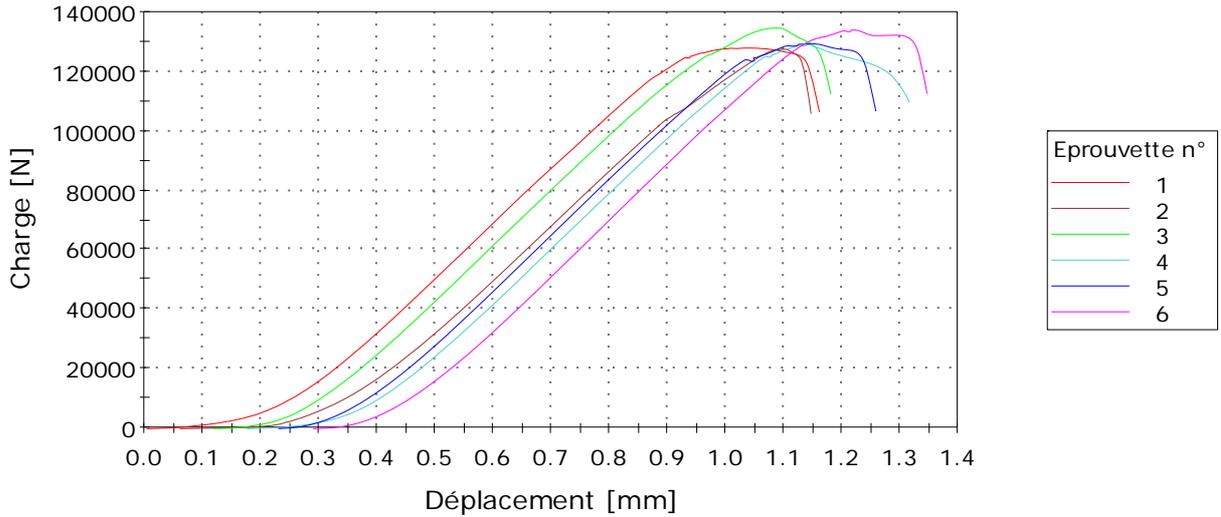
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	117557	73,47
	2	40,00	40,00	40,00	112665	70,42
	3	40,00	40,00	40,00	113060	70,66
	4	40,00	40,00	40,00	116448	72,78
	5	40,00	40,00	40,00	115203	72,00
	6	40,00	40,00	40,00	118622	74,14
Moy.		40,00	40,00	40,00	115592	72,25
E-T		0,00	0,00	0,00	2404,10	1,50

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	YV
Date	13/07/22
Température (°C)	23,8
Humidité (%)	49,2
Etat	28 jours
Type	TV28_2

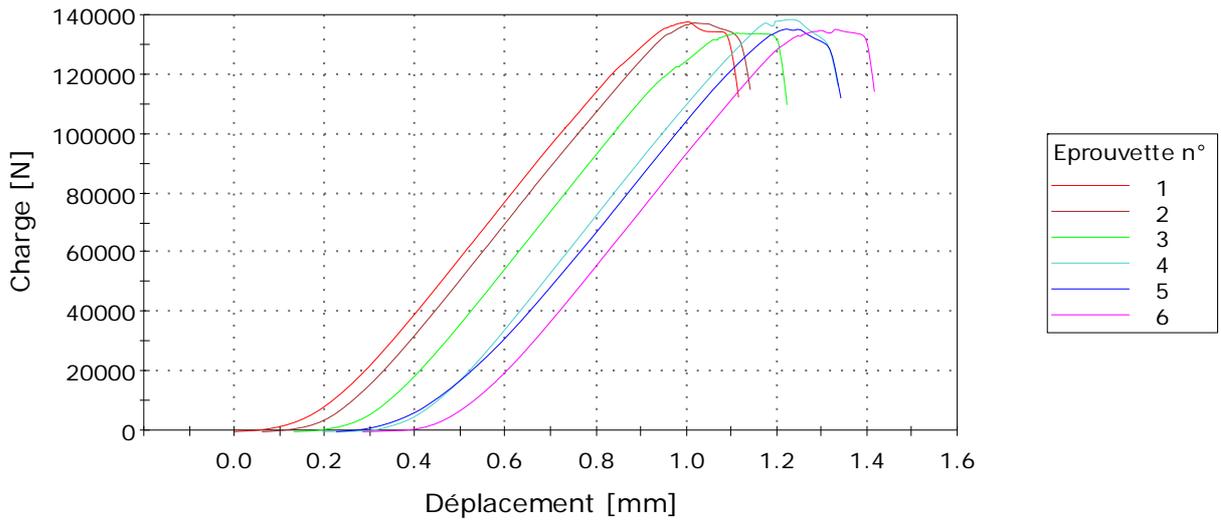
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	127829	79,89
	2	40,00	40,00	40,00	127385	79,62
	3	40,00	40,00	40,00	134527	84,08
	4	40,00	40,00	40,00	128867	80,54
	5	40,00	40,00	40,00	129217	80,76
	6	40,00	40,00	40,00	133914	83,70
Moy.		40,00	40,00	40,00	130290	81,43
E-T		0,00	0,00	0,00	3122,72	1,95

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	YV
Date	18/08/22
Température (°C)	23,5
Humidité (%)	54,6
Etat	56 jours
Type	tv56

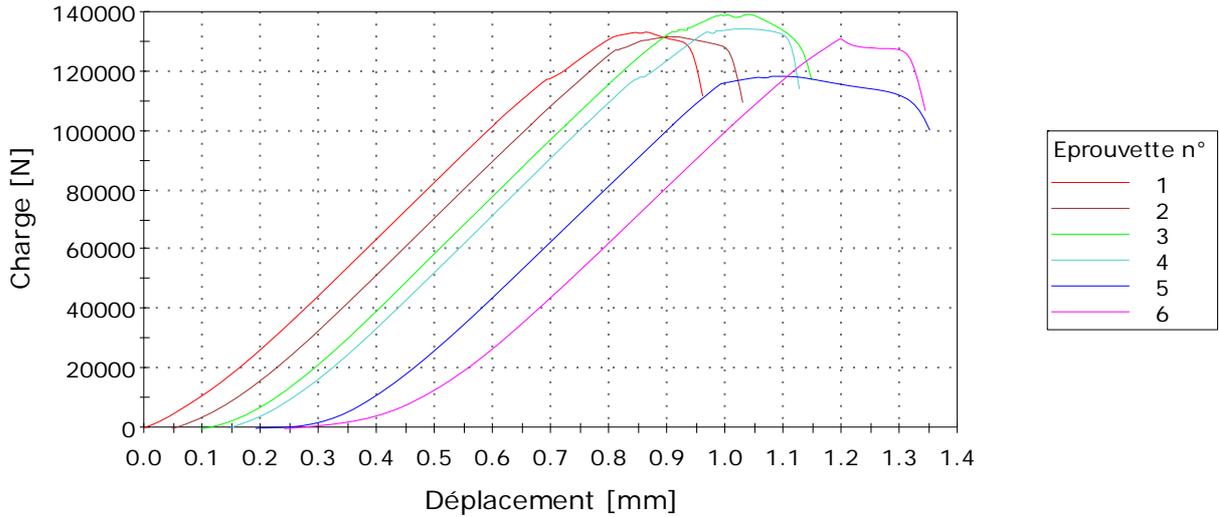
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	137564	85,98
	2	40,00	40,00	40,00	137204	85,75
	3	40,00	40,00	40,00	133798	83,62
	4	40,00	40,00	40,00	138324	86,45
	5	40,00	40,00	40,00	135167	84,48
	6	40,00	40,00	40,00	135011	84,38
Moy.		40,00	40,00	40,00	136178	85,11
E-T		0,00	0,00	0,00	1767,86	1,10

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	ADA
Date	25/10/22
Température (°C)	23
Humidité (%)	50
Etat	56 jours
Type	tv 56 27/07/22

Eprouvette 1 à 6

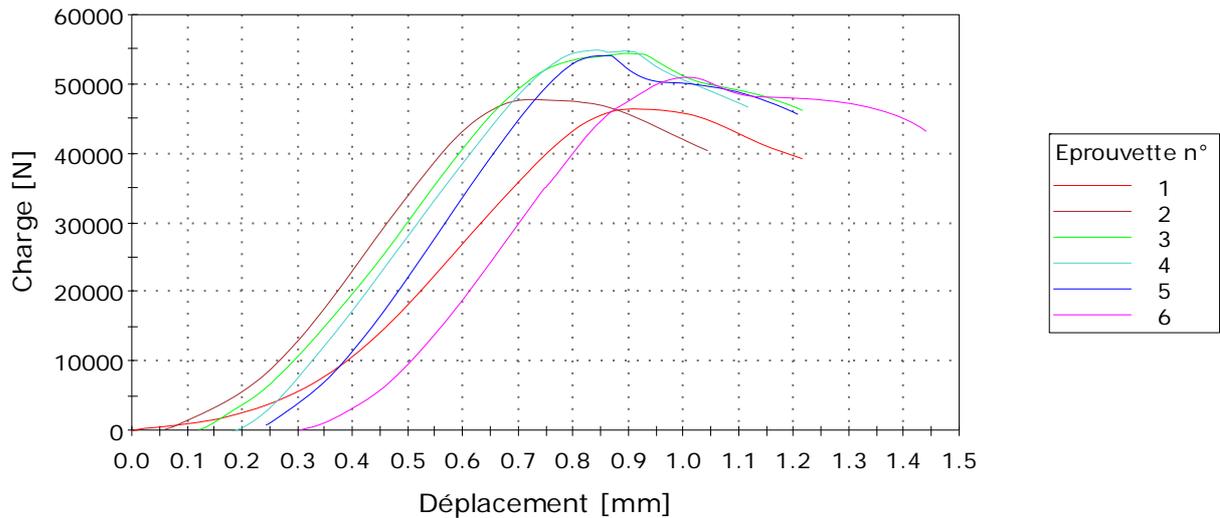


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	133090	83,18
	2	40,00	40,00	40,00	131563	82,23
	3	40,00	40,00	40,00	138984	86,86
	4	40,00	40,00	40,00	134218	83,89
	5	40,00	40,00	40,00	118300	73,94
	6	40,00	40,00	40,00	130846	81,78
	Moy.	40,00	40,00	40,00	131167	81,98
	E-T	0,00	0,00	0,00	6927,06	4,33

A.5.3 Échantillons imprimés, sable recyclé, testés dans le sens de pose

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	ADA
Date	03/02/23
Température (°C)	23,6
Humidité (%)	41,9
Etat	2 jours
Type	sens de pose

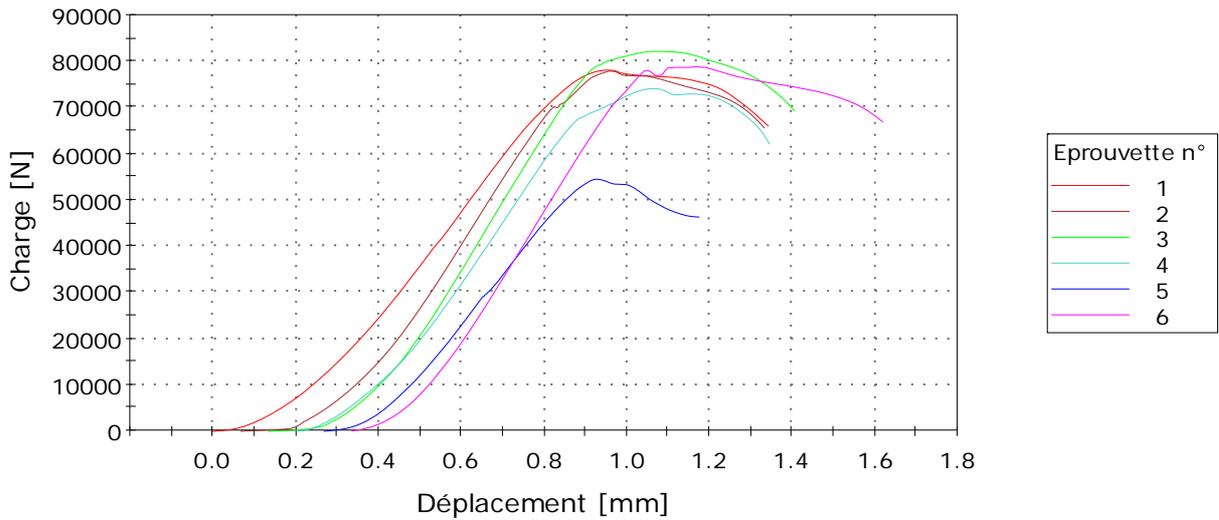
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	1a	40,00	40,00	46425	29,02
	2	1b	40,00	40,00	47792	29,87
	3	2a	40,00	40,00	54437	34,02
	4	2b	40,00	40,00	54912	34,32
	5	3a	40,00	40,00	54108	33,82
	6	3b	40,00	40,00	50979	31,86
Moy.			40,00	40,00	51442	32,15
E-T			0,00	0,00	3655,77	2,28

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	YV
Date	08/02/23
Température (°C)	23,4
Humidité (%)	36,9
Etat	7 jours
Type	douai 7 jours sens de pose

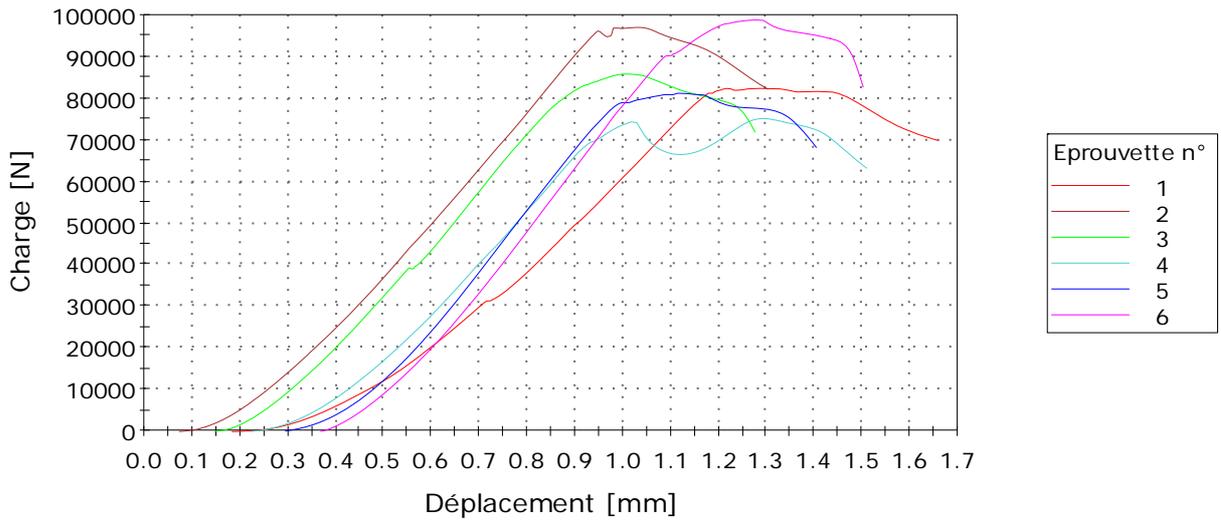
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	39,91	40,00	77964	48,84
	2	40,00	39,91	40,00	77824	48,75
	3	40,00	39,88	40,00	82059	51,44
	4	40,00	39,88	40,00	74035	46,41
	5	40,00	39,55	40,00	54498	34,45
	6	40,00	39,55	40,00	78701	49,75
Moy.		40,00	39,78	40,00	74180	46,61
E-T		0,00	0,18	0,00	9975,29	6,18

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	YV
Date	01/03/23
Température (°C)	23,6
Humidité (%)	28,4
Etat	28 jours
Type	Douai 28 jours sens de pose

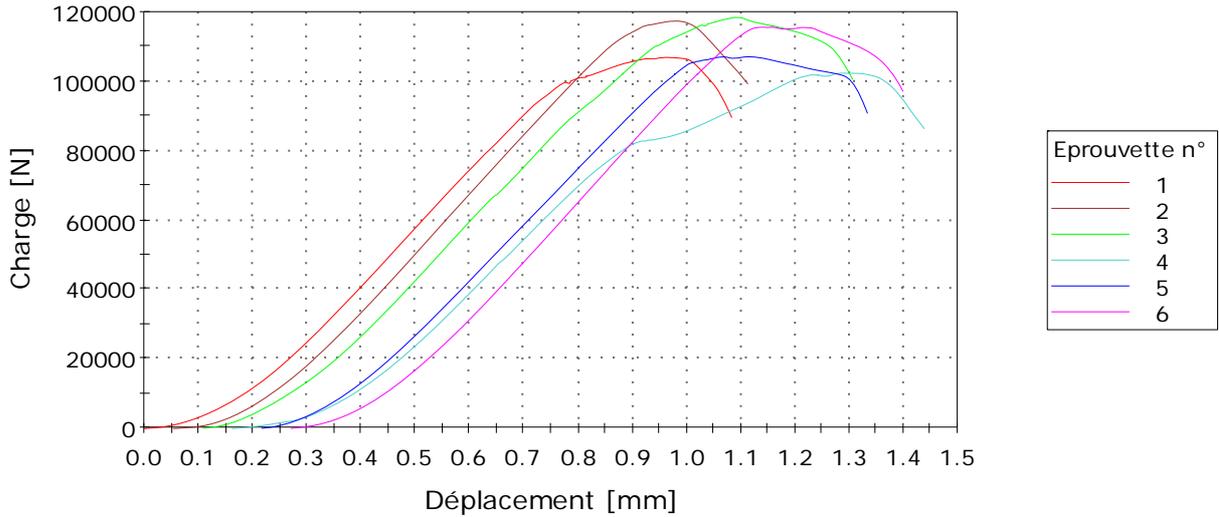
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	82313	51,45
	2	40,00	40,00	40,00	96889	60,56
	3	40,00	40,00	40,00	85697	53,56
	4	40,00	40,00	40,00	75094	46,93
	5	40,00	40,00	40,00	81158	50,72
	6	40,00	40,00	40,00	98721	61,70
Moy.		40,00	40,00	40,00	86645	54,15
E-T		0,00	0,00	0,00	9316,41	5,82

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	YV
Date	29/03/23
Température (°C)	23,6
Humidité (%)	47,0
Etat	56 jours
Type	Douai 56 jours sens de pose

Eprouvette 1 à 6

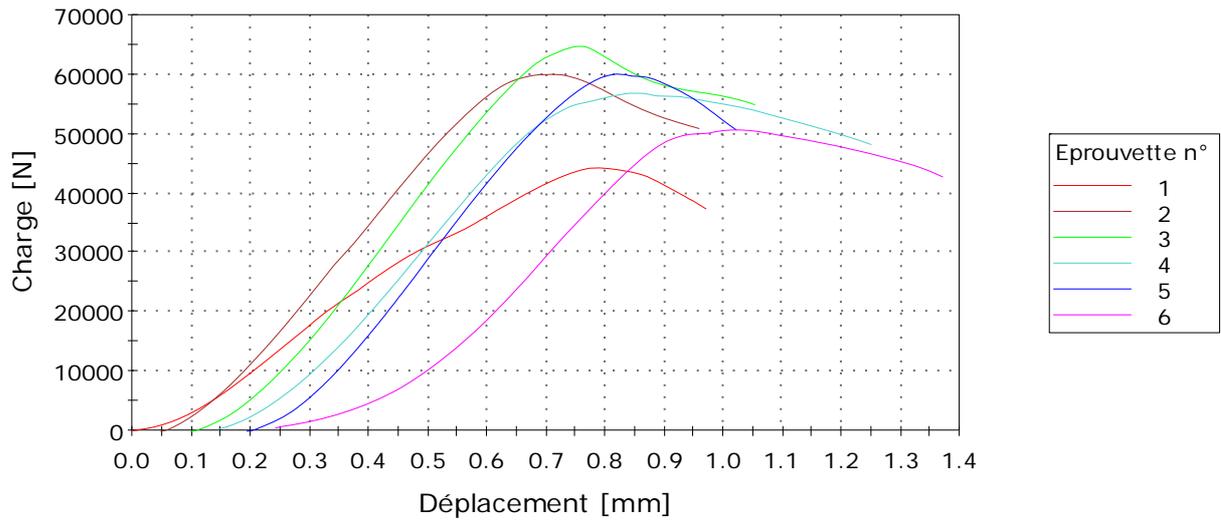


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]	
	1	1a	40,00	40,00	40,00	106764	66,73
	2	1b	40,00	40,00	40,00	117214	73,26
	3	2a	40,00	40,00	40,00	118311	73,94
	4	2b	40,00	40,00	40,00	102278	63,92
	5	3a	40,00	40,00	40,00	106971	66,86
	6	3b	40,00	40,00	40,00	115529	72,21
Moy.			40,00	40,00	40,00	111178	69,49
E-T			0,00	0,00	0,00	6672,82	4,17

A.5.4 Échantillons imprimés, sable recyclé, testés dans le sens perpendiculaire à la pose

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	ADA
Date	03/02/23
Température (°C)	23,6
Humidité (%)	41,9
Etat	2 jours
Type	perpendiculaire au sens de pose

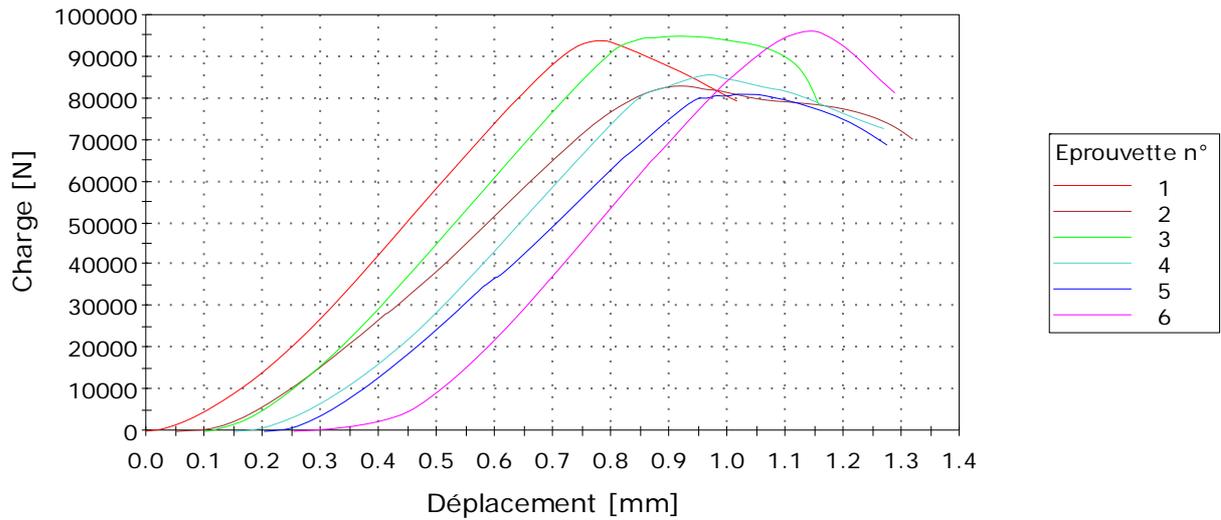
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	Aa	40,00	40,00	44261	27,66
	2	Ab	40,00	40,00	59978	37,49
	3	Ba	40,00	40,00	64654	40,41
	4	Bb	40,00	40,00	56804	35,50
	5	Ca	40,00	40,00	60011	37,51
	6	Cb	40,00	40,00	50668	31,67
Moy.			40,00	40,00	56063	35,04
E-T			0,00	0,00	7397,89	4,62

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	YV
Date	08/02/23
Température (°C)	23,5
Humidité (%)	37,3
Etat	7 jours
Type	Douai 7j sens perpendiculaire à la pose

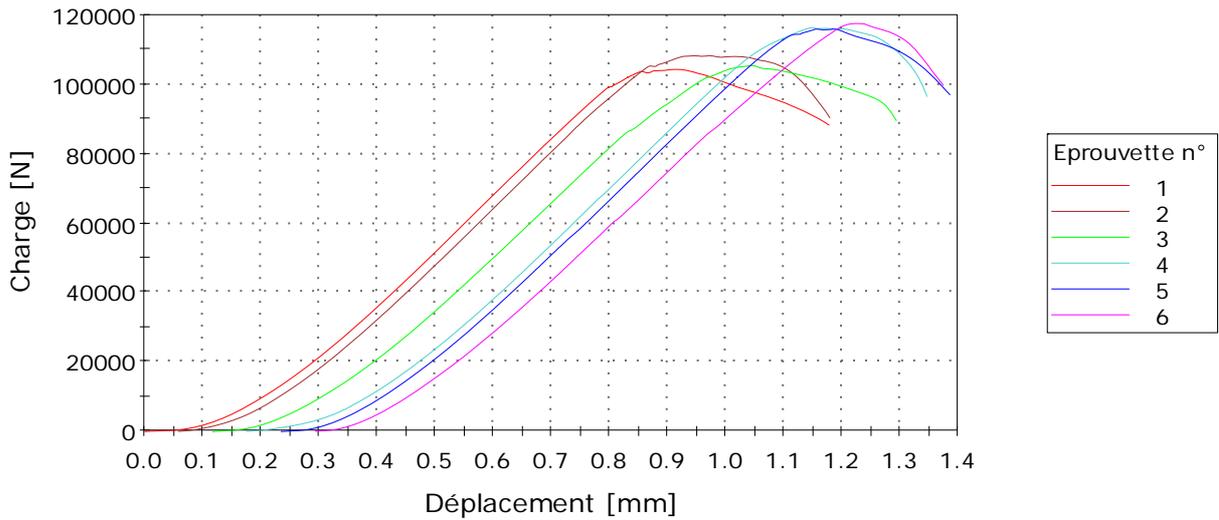
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	93754	58,60
	2	40,00	40,00	40,00	82888	51,81
	3	40,00	40,00	40,00	94864	59,29
	4	40,00	40,00	40,00	85575	53,48
	5	40,00	40,00	40,00	80923	50,58
	6	40,00	40,00	40,00	95998	60,00
Moy.		40,00	40,00	40,00	89000	55,63
E-T		0,00	0,00	0,00	6637,29	4,15

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	YV
Date	01/03/23
Température (°C)	23,6
Humidité (%)	29,5
Etat	28 jours
Type	Douai 28 jours sens perpendiculaire à la pose

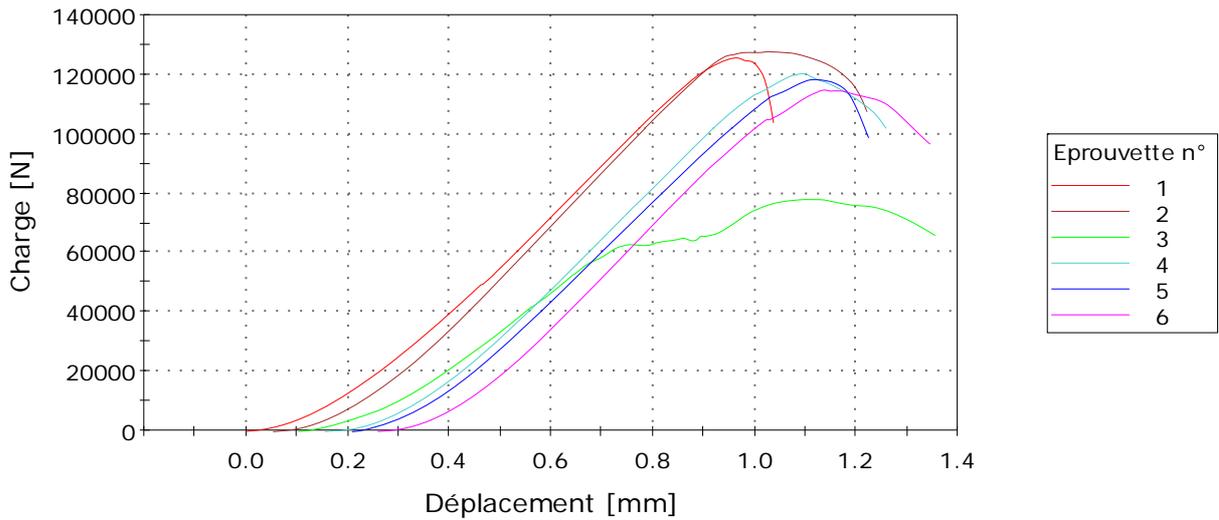
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	104235	65,15
	2	40,00	40,00	40,00	108176	67,61
	3	40,00	40,00	40,00	105332	65,83
	4	40,00	40,00	40,00	116265	72,67
	5	40,00	40,00	40,00	115830	72,39
	6	40,00	40,00	40,00	117459	73,41
Moy.		40,00	40,00	40,00	111216	69,51
E-T		0,00	0,00	0,00	5972,53	3,73

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	YV
Date	29/03/23
Température (°C)	23,4
Humidité (%)	48,2
Etat	56 jours
Type	Douai 56 jours sens perpendiculaire à la pose

Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	125410	78,38
	2	40,00	40,00	40,00	127539	79,71
	3	40,00	40,00	40,00	77908	48,69
	4	40,00	40,00	40,00	120134	75,08
	5	40,00	40,00	40,00	118201	73,88
	6	40,00	40,00	40,00	114678	71,67
Moy.		40,00	40,00	40,00	113978	71,24
E-T		0,00	0,00	0,00	18285,66	11,43

A.6 Résultats des essais de porosité : porosité accessible à l'eau, masse volumique réelle, masse volumique apparente

A.6.1 Échantillons moulés, sable naturel

Échantillons moulés, sable naturel, porosité après 2 jours, cure dans l'eau							
Numéro	Largeur [mm]	Longueur [mm]	Hauteur [mm]	Volume total [mm ³]	M _{air} [g]	M _{eau} [g]	M _{sec} [g]
1	40,20	40,36	49,34	80053	178,16	99,51	162,90
2	39,90	40,84	49,20	80172	181,27	101,61	165,87
3	39,96	40,82	49,36	80514	182,17	102,50	166,74
Moyenne							

Échantillons moulés, sable naturel, porosité après 2 jours, cure dans l'eau					
Porosité n [%]	Volume solide Vs [mm ³]	Rho _{app} [g/mm ³]	Rho _{app} [kg/m ³]	Rho _{réel} [g/mm ³]	Rho _{réel} [kg/m ³]
19,40	64521	0,002034908	2035	0,002524775	2525
19,33	64673	0,002068922	2069	0,002564742	2565
19,37	64921	0,002070934	2071	0,002568357	2568
19,37			2058		2553

FIGURE 3 – Porosité et masses volumiques après 2 jours

Échantillons moulés, sable naturel, porosité après 7 jours, cure dans l'eau							
Numéro	Largeur [mm]	Longueur [mm]	Hauteur [mm]	Volume total [mm ³]	M _{air} [g]	M _{eau} [g]	M _{sec} [g]
1	40,12	40,46	51,25	83192	187,15	104,36	171,47
2	39,84	40,43	51,62	83146	188,32	105,56	172,99
3	39,99	40,38	51,47	83114	189,03	105,81	173,57
Moyenne							

Échantillons moulés, sable naturel, porosité après 7 jours, cure dans l'eau					
Porosité n [%]	Volume solide Vs [mm ³]	Rho _{app} [g/mm ³]	Rho _{app} [kg/m ³]	Rho _{réel} [g/mm ³]	Rho _{réel} [kg/m ³]
18,94	67436	0,00206114	2061	0,002542718	2543
18,52	67744	0,002080558	2081	0,002553567	2554
18,58	67673	0,002088348	2088	0,002564821	2565
18,68			2077		2554

FIGURE 4 – Porosité et masses volumiques après 7 jours

Échantillons moulés, sable naturel, porosité après 28 jours, cure dans l'eau							
Numéro	Largeur [mm]	Longueur [mm]	Hauteur [mm]	Volume total [mm ³]	M _{air} [g]	M _{eau} [g]	M _{sec} [g]
1	40,15	41,30	49,96	82843	186,17	104,56	171,45
2	39,99	40,31	49,69	80100	180,16	101,35	166,18
3	40,04	40,02	49,27	78950	177,78	99,89	163,92
Moyenne							

Échantillons moulés, sable naturel, porosité après 28 jours, cure dans l'eau					
Porosité n [%]	Volume solide Vs [mm ³]	Rho _{app} [g/mm ³]	Rho _{app} [kg/m ³]	Rho _{réel} [g/mm ³]	Rho _{réel} [kg/m ³]
18,04	67901	0,002069567	2070	0,002525001	2525
17,74	65891	0,002074653	2075	0,002522034	2522
17,79	64902	0,002076243	2076	0,002525669	2526
17,86			2073		2524

FIGURE 5 – Porosité et masses volumiques après 28 jours

Échantillons moulés, sable naturel, porosité après 56 jours, cure dans l'eau							
Numéro	Largeur [mm]	Longueur [mm]	Hauteur [mm]	Volume total [mm3]	M_air [g]	M_eau [g]	M_sec [g]
1	40,10	40,92	52,44	86048	194,52	109,39	179,38
2	39,84	40,42	52,17	84011	190,96	107,61	176,26
3	40,13	40,45	52,47	85172	193,38	108,95	178,43
Moyenne							

Échantillons moulés, sable naturel, porosité après 56 jours, cure dans l'eau					
Porosité n [%]	Volume solide Vs [mm3]	Rho_app [g/mm3]	Rho_app [kg/m3]	Rho_réal [g/mm3]	Rho_réal [kg/m3]
17,78	70745	0,002084641	2085	0,002535584	2536
17,64	69194	0,002098057	2098	0,002547313	2547
17,71	70091	0,002094928	2095	0,002545693	2546
17,71			2093		2543

FIGURE 6 – Porosité et masses volumiques après 56 jours

Échantillons moulés, sable naturel, porosité après 90 jours, cure dans l'eau							
Numéro	Largeur [mm]	Longueur [mm]	Hauteur [mm]	Volume total [mm3]	M_air [g]	M_eau [g]	M_sec [g]
1	40,19	40,37	49,73	80685	183,07	103,00	168,91
2	39,96	40,65	49,70	80731	182,16	102,44	168,00
3	40,09	40,31	50,46	81545	184,03	103,50	169,93
Moyenne							

Échantillons moulés, sable naturel, porosité après 90 jours, cure dans l'eau					
Porosité n [%]	Volume solide Vs [mm3]	Rho_app [g/mm3]	Rho_app [kg/m3]	Rho_réal [g/mm3]	Rho_réal [kg/m3]
17,68	66417	0,002093438	2093	0,002543189	2543
17,76	66392	0,002080975	2081	0,002530435	2530
17,51	67267	0,002083886	2084	0,002526198	2526
17,65			2086		2533

FIGURE 7 – Porosité et masses volumiques après 90 jours

A.6.2 Échantillons moulés, sable recyclé

Échantillons moulés, sable recyclé, porosité après 2 jours, cure dans l'eau							
Numéro	Largeur [mm]	Longueur [mm]	Hauteur [mm]	Volume total [mm3]	M_air [g]	M_eau [g]	M_sec [g]
2a	39,97	40,16	49,90	80099	172,28	93,42	155,80
2b	39,99	40,86	50,11	81879	178,51	97,19	161,35
2c	39,95	40,79	52,90	86204	187,93	102,47	170,01
3a	39,97	40,04	50,44	80724	176,97	96,59	159,96
3b	40,10	40,56	49,81	81014	176,87	96,35	159,88
3c	40,06	40,82	52,29	85507	187,08	101,77	168,99
Moyenne							

Échantillons moulés, sable recyclé, porosité après 2 jours, cure dans l'eau					
Porosité n [%]	Volume solide Vs [mm3]	Rho_app [g/mm3]	Rho_app [kg/m3]	Rho_réal [g/mm3]	Rho_réal [kg/m3]
20,90	63360	0,001945087	1945	0,002458954	2459
21,10	64601	0,001970583	1971	0,002497628	2498
20,97	68128	0,001972188	1972	0,002495457	2495
21,16	63641	0,001981564	1982	0,002513462	2513
21,10	63920	0,001973492	1973	0,002501268	2501
21,21	67375	0,001976325	1976	0,002508187	2508
21,07			1970		2496

FIGURE 8 – Porosité et masses volumiques après 2 jours

Échantillons moulés, sable recyclé, porosité après 7 jours, cure dans l'eau							
Numéro	Largeur [mm]	Longueur [mm]	Hauteur [mm]	Volume total [mm ³]	M_air [g]	M_eau [g]	M_sec [g]
2a	39,98	40,12	48,46	77730	171,14	93,57	155,43
2b	40,32	40,48	49,34	80530	174,66	95,26	158,58
2c	40,03	40,82	55,49	90672	197,76	107,91	179,57
3a	40,01	40,24	55,64	89581	195,38	106,63	177,52
3b	40,16	40,38	49,96	81018	177,30	96,60	160,90
3c	40,11	40,73	48,88	79854	171,40	93,66	155,62
Moyenne							

Échantillons moulés, sable recyclé, porosité après 7 jours, cure dans l'eau					
Porosité n [%]	Volume solide Vs [mm ³]	Rho_app [g/mm ³]	Rho_app [kg/m ³]	Rho_réal [g/mm ³]	Rho_réal [kg/m ³]
20,25	61987	0,001999621	2000	0,002507446	2507
20,25	64222	0,001969193	1969	0,002469266	2469
20,24	72316	0,001980434	1980	0,002483143	2483
20,12	71553	0,001981681	1982	0,002480944	2481
20,32	64554	0,001985974	1986	0,002492506	2493
20,30	63645	0,001948799	1949	0,002445121	2445
20,25			1978		2480

FIGURE 9 – Porosité et masses volumiques après 7 jours

Échantillons moulés, sable recyclé, porosité après 28 jours, cure dans l'eau							
Numéro	Largeur [mm]	Longueur [mm]	Hauteur [mm]	Volume total [mm ³]	M_air [g]	M_eau [g]	M_sec [g]
2a	39,86	40,21	51,81	83040	180,47	98,25	163,65
2b	39,78	40,83	50,84	82575	181,37	98,99	164,48
2c	40,00	41,17	50,36	82933	181,41	99,34	164,70
3a	40,06	40,15	51,44	82737	183,31	100,40	166,49
3b	40,17	40,75	50,58	82796	182,41	99,91	165,72
3c	40,32	41,08	50,67	83927	184,79	101,41	167,71
Moyenne							

Échantillons moulés, sable recyclé, porosité après 28 jours, cure dans l'eau					
Porosité n [%]	Volume solide Vs [mm ³]	Rho_app [g/mm ³]	Rho_app [kg/m ³]	Rho_réal [g/mm ³]	Rho_réal [kg/m ³]
20,46	66052	0,001970748	1971	0,002477598	2478
20,50	65645	0,001991881	1992	0,002505591	2506
20,36	66047	0,001985944	1986	0,002493672	2494
20,29	65952	0,002012291	2012	0,002524421	2524
20,23	66046	0,002001551	2002	0,002509162	2509
20,48	66735	0,001998283	1998	0,002513075	2513
20,39			1993		2504

FIGURE 10 – Porosité et masses volumiques après 28 jours

Échantillons moulés, sable recyclé, porosité après 56 jours, cure dans l'eau							
Numéro	Largeur [mm]	Longueur [mm]	Hauteur [mm]	Volume total [mm ³]	M_air [g]	M_eau [g]	M_sec [g]
1	39,98	40,41	49,36	79746	171,90	94,57	155,92
2	39,90	40,44	49,11	79242	174,39	95,80	158,15
3	40,01	40,53	49,51	80286	177,78	97,75	161,20
Moyenne							

Échantillons moulés, sable recyclé, porosité après 56 jours, cure dans l'eau					
Porosité n [%]	Volume solide Vs [mm ³]	Rho_app [g/mm ³]	Rho_app [kg/m ³]	Rho_réal [g/mm ³]	Rho_réal [kg/m ³]
20,66	63266	0,001955217	1955	0,002464498	2464
20,66	62867	0,001995792	1996	0,002515626	2516
20,72	63653	0,00200783	2008	0,002532492	2532
20,68			1986		2504

FIGURE 11 – Porosité et masses volumiques après 56 jours

Échantillons moulés, sable recyclé, porosité après 91 jours, cure dans l'eau							
Numéro	Largeur [mm]	Longueur [mm]	Hauteur [mm]	Volume total [mm ³]	M_air [g]	M_eau [g]	M_sec [g]
1	40,08	40,67	54,37	88626	190,53	104,71	173,25
2	39,97	40,68	54,66	88876	196,62	108,18	179,07
3	40,04	40,79	54,03	88244	195,34	107,51	177,75
Moyenne							

Échantillons moulés, sable recyclé, porosité après 91 jours, cure dans l'eau					
Porosité n [%]	Volume solide Vs [mm ³]	Rho_app [g/mm ³]	Rho_app [kg/m ³]	Rho_réel [g/mm ³]	Rho_réel [kg/m ³]
20,14	70781	0,001954844	1955	0,00244769	2448
19,84	71240	0,002014829	2015	0,002513633	2514
20,03	70571	0,002014313	2014	0,002518751	2519
20,00			1995		2493

FIGURE 12 – Porosité et masses volumiques après 91 jours

A.6.3 Échantillons imprimés, sable recyclé

Échantillons imprimés, sable recyclé, porosité après 7 jours, cure dans l'eau							
Numéro	Largeur [mm]	Longueur [mm]	Hauteur [mm]	Volume total [mm ³]	M_air [g]	M_eau [g]	M_sec [g]
1	39,63	39,78	39,30	61956	136,00	74,45	124,42
2	39,30	39,85	39,87	62441	137,27	75,36	125,75
3	39,60	39,78	39,87	62807	136,34	74,28	124,53
Moyenne							

Échantillons imprimés, sable recyclé, porosité après 7 jours, cure dans l'eau					
Porosité n [%]	Volume solide Vs [mm ³]	Rho_app [g/mm ³]	Rho_app [kg/m ³]	Rho_réel [g/mm ³]	Rho_réel [kg/m ³]
18,81	50299	0,002008208	2008	0,002473589	2474
18,61	50822	0,002013914	2014	0,002474328	2474
19,03	50855	0,001982749	1983	0,002448745	2449
18,82			2002		2466

FIGURE 13 – Porosité et masses volumiques après 7 jours

Échantillons imprimés, sable recyclé, porosité après 28 jours, cure dans l'eau							
Numéro	Largeur [mm]	Longueur [mm]	Hauteur [mm]	Volume total [mm ³]	M_air [g]	M_eau [g]	M_sec [g]
1	41,13	40,78	40,83	68483	147,05	79,61	134,76
2	41,15	40,54	40,85	68147	147,26	80,01	135,08
3	40,54	40,33	40,71	66560	146,87	79,72	134,50
Moyenne							

Échantillons imprimés, sable recyclé, porosité après 28 jours, cure dans l'eau					
Porosité n [%]	Volume solide Vs [mm ³]	Rho_app [g/mm ³]	Rho_app [kg/m ³]	Rho_réel [g/mm ³]	Rho_réel [kg/m ³]
18,22	56003	0,001967776	1968	0,002406289	2406
18,11	55804	0,001982191	1982	0,002420598	2421
18,42	54299	0,002020734	2021	0,002477041	2477
18,25			1990		2435

FIGURE 14 – Porosité et masses volumiques après 28 jours

Échantillons imprimés, sable recyclé, porosité après 56 jours, cure dans l'eau							
Numéro	Largeur [mm]	Longueur [mm]	Hauteur [mm]	Volume total [mm3]	M_air [g]	M_eau [g]	M_sec [g]
1	40,89	40,98	40,77	68317	148,27	80,67	135,91
2	40,75	41,19	41,06	68919	148,46	80,34	136,17
3	40,78	41	40,88	68351	148,82	80,69	136,34
Moyenne							

Échantillons imprimés, sable recyclé, porosité après 56 jours, cure dans l'eau					
Porosité n [%]	Volume solide Vs [mm3]	Rho_app [g/mm3]	Rho_app [kg/m3]	Rho_réel [g/mm3]	Rho_réel [kg/m3]
18,28	55826	0,001989398	1989	0,002434527	2435
18,04	56485	0,0019758	1976	0,002410738	2411
18,32	55830	0,001994717	1995	0,00244205	2442
18,21			1987		2429

FIGURE 15 – Porosité et masses volumiques après 56 jours

Échantillons imprimés, sable recyclé, porosité après 91 jours, cure dans l'eau							
Numéro	Largeur [mm]	Longueur [mm]	Hauteur [mm]	Volume total [mm3]	M_air [g]	M_eau [g]	M_sec [g]
1	39,67	40,03	40,08	63647	138,74	75,39	127,72
2	39,49	40,04	40,13	63453	138,61	75,65	127,67
3	40,14	39,88	40,07	64143	138,32	75,22	127,41
Moyenne							

Échantillons imprimés, sable recyclé, porosité après 91 jours, cure dans l'eau					
Porosité n [%]	Volume solide Vs [mm3]	Rho_app [g/mm3]	Rho_app [kg/m3]	Rho_réel [g/mm3]	Rho_réel [kg/m3]
17,40	52575	0,002006704	2007	0,00242929	2429
17,38	52427	0,002012049	2012	0,00243519	2435
17,29	53053	0,001986331	1986	0,002401562	2402
17,35			2002		2422

FIGURE 16 – Porosité et masses volumiques après 91 jours

A.7 Résultats des essais d'absorption d'eau par capillarité

A.7.1 Échantillons moulés, sable naturel

Absorption sur la face du bas (bottom absorption)																
Temps [h]	Masses [g]	BA1	BA2	BA3	Masse d'eau absorbée [g]	BA1	BA2	BA3	Moyenne	Ecart-type	Capillary absorption CA [kg/m^2]	BA1	BA2	BA3	Moyenne	Ecart-type
0	Début	428,49	430,01	419,71	Début						Début					
0,2	12 minutes	430,08	431,56	421,42	12 minutes	1,59	1,55	1,71	1,62	0,08	12 minutes	0,248	0,242	0,267	0,253	0,013
0,5	30 minutes	430,56	432,03	421,87	30 minutes	2,07	2,02	2,16	2,08	0,07	30 minutes	0,323	0,316	0,338	0,326	0,011
1	1 heure	430,93	432,37	422,36	1 heure	2,44	2,36	2,65	2,48	0,15	1 heure	0,381	0,369	0,414	0,388	0,023
2	2 heures	431,32	432,77	422,77	2 heures	2,83	2,76	3,06	2,88	0,16	2 heures	0,442	0,431	0,478	0,451	0,025
4	4 heures	431,8	433,19	423,27	4 heures	3,31	3,18	3,56	3,35	0,19	4 heures	0,517	0,497	0,556	0,523	0,030
24	1 jour	433,05	434,36	424,72	1 jour	4,56	4,35	5,01	4,64	0,34	1 jour	0,713	0,680	0,783	0,725	0,053
48	2 jours	433,7	435,1	425,47	2 jours	5,21	5,09	5,76	5,35	0,36	2 jours	0,814	0,795	0,900	0,836	0,056
72	3 jours	434,22	435,57	426	3 jours	5,73	5,56	6,29	5,86	0,38	3 jours	0,895	0,869	0,983	0,916	0,060
96	4 jours	434,56	435,85	426,42	4 jours	6,07	5,84	6,71	6,21	0,45	4 jours	0,948	0,913	1,048	0,970	0,070
168	7 jours	435,53	436,89	427,2	7 jours	7,04	6,88	7,49	7,14	0,32	7 jours	1,100	1,075	1,170	1,115	0,049

FIGURE 17 – Absorption d'eau par la surface du bas

Absorption sur la face latérale (lateral absorption)																
Temps [h]	Masses [g]	LA1	LA2	LA3	Masse d'eau absorbée [g]	LA1	LA2	LA3	Moyenne	Ecart-type	Capillary absorption CA [kg/m ²]	LA1	LA2	LA3	Moyenne	Ecart-type
0	Début	433,77	425,64	427,94	Début						Début					
0,2	12 minutes	435,29	427,12	429,46	12 minutes	1,52	1,48	1,52	1,51	0,02	12 minutes	0,238	0,231	0,237	0,235	0,004
0,5	30 minutes	435,72	427,48	429,86	30 minutes	1,95	1,84	1,92	1,90	0,06	30 minutes	0,305	0,288	0,300	0,297	0,009
1	1 heure	436,09	427,84	430,13	1 heure	2,32	2,20	2,19	2,24	0,07	1 heure	0,362	0,344	0,342	0,349	0,011
2	2 heures	436,51	428,22	430,43	2 heures	2,74	2,58	2,49	2,60	0,13	2 heures	0,428	0,403	0,389	0,407	0,020
4	4 heures	436,89	428,52	430,74	4 heures	3,12	2,88	2,80	2,93	0,17	4 heures	0,488	0,450	0,438	0,458	0,026
24	1 jour	438,13	429,72	431,96	1 jour	4,36	4,08	4,02	4,15	0,18	1 jour	0,681	0,638	0,628	0,649	0,028
48	2 jours	438,85	430,37	432,55	2 jours	5,08	4,73	4,61	4,81	0,24	2 jours	0,794	0,739	0,720	0,751	0,038
72	3 jours	439,31	430,86	433,01	3 jours	5,54	5,22	5,07	5,28	0,24	3 jours	0,866	0,816	0,792	0,824	0,038
96	4 jours	439,63	431,23	433,33	4 jours	5,86	5,59	5,39	5,61	0,24	4 jours	0,916	0,873	0,842	0,877	0,037
168	7 jours	440,38	432,17	434,18	7 jours	6,61	6,53	6,24	6,46	0,19	7 jours	1,033	1,020	0,975	1,009	0,030

FIGURE 18 – Absorption d'eau par la surface latérale

Absorption sur la face verticale (vertical absorption)																
Temps [h]	Masses [g]	VA1	VA2	VA3	Masse d'eau absorbée [g]	VA1	VA2	VA3	Moyenne	Ecart-type	Capillary absorption CA [kg/m ²]	VA1	VA2	VA3	Moyenne	Ecart-type
0	Début	540,6	536,37	524,1	Début						Début					
0,2	12 minutes	541,03	536,85	524,59	12 minutes	0,43	0,48	0,49	0,47	0,03	12 minutes	0,269	0,300	0,306	0,292	0,020
0,5	30 minutes	541,19	537,01	524,81	30 minutes	0,59	0,64	0,71	0,65	0,06	30 minutes	0,369	0,400	0,444	0,404	0,038
1	1 heure	541,32	537,17	525,02	1 heure	0,72	0,8	0,92	0,81	0,10	1 heure	0,450	0,500	0,575	0,508	0,063
2	2 heures	541,49	537,36	525,19	2 heures	0,89	0,99	1,09	0,99	0,10	2 heures	0,556	0,619	0,681	0,619	0,063
4	4 heures	541,64	537,51	525,37	4 heures	1,04	1,14	1,27	1,15	0,12	4 heures	0,650	0,712	0,794	0,719	0,072
24	1 jour	542,71	538,53	526,48	1 jour	2,11	2,16	2,38	2,22	0,14	1 jour	1,319	1,350	1,488	1,385	0,090
48	2 jours	543,47	539,28	527,32	2 jours	2,87	2,91	3,22	3,00	0,19	2 jours	1,794	1,819	2,013	1,875	0,120
72	3 jours	544,11	539,9	527,97	3 jours	3,51	3,53	3,87	3,64	0,20	3 jours	2,194	2,206	2,419	2,273	0,126
96	4 jours	544,61	540,38	528,49	4 jours	4,01	4,01	4,39	4,14	0,22	4 jours	2,506	2,506	2,744	2,585	0,137
168	7 jours	545,68	541,57	529,67	7 jours	5,08	5,2	5,57	5,28	0,26	7 jours	3,175	3,250	3,481	3,302	0,160

FIGURE 19 – Absorption d'eau par la surface verticale

A.7.2 Échantillons moulés, sable recyclé

Absorption sur la face du bas (bottom absorption)																
Temps [h]	Masses [g]	BA1	BA2	BA3	Masse d'eau absorbée [g]	BA1	BA2	BA3	Moyenne	Ecart-type	Capillary absorption CA [kg/m ²]	BA1	BA2	BA3	Moyenne	Ecart-type
0	Début	411,79	407,85	403,06	Début						Début					
0,2	12 minutes	413,36	409,45	404,72	12 minutes	1,57	1,60	1,66	1,61	0,05	12 minutes	0,245	0,250	0,259	0,252	0,007
0,5	30 minutes	413,8	409,96	405,17	30 minutes	2,01	2,11	2,11	2,08	0,06	30 minutes	0,314	0,330	0,330	0,324	0,009
1	1 heure	414,19	410,38	405,57	1 heure	2,40	2,53	2,51	2,48	0,07	1 heure	0,375	0,395	0,392	0,387	0,011
2	2 heures	414,47	410,74	405,87	2 heures	2,68	2,89	2,81	2,79	0,11	2 heures	0,419	0,452	0,439	0,436	0,017
4	4 heures	414,85	411,15	406,26	4 heures	3,06	3,30	3,20	3,19	0,12	4 heures	0,478	0,516	0,500	0,498	0,019
24	1 jour	416,21	412,57	407,7	1 jour	4,42	4,72	4,64	4,59	0,16	1 jour	0,691	0,737	0,725	0,718	0,024
48	2 jours	417,1	413,42	408,7	2 jours	5,31	5,57	5,64	5,51	0,17	2 jours	0,830	0,870	0,881	0,860	0,027
72	3 jours	417,8	414,07	409,31	3 jours	6,01	6,22	6,25	6,16	0,13	3 jours	0,939	0,972	0,977	0,962	0,020
96	4 jours	418,42	414,67	409,93	4 jours	6,63	6,82	6,87	6,77	0,13	4 jours	1,036	1,066	1,073	1,058	0,020
240	10 jours	420,86	416,97	412,37	10 jours	9,07	9,12	9,31	9,17	0,13	10 jours	1,417	1,425	1,455	1,432	0,020

FIGURE 20 – Absorption d'eau par la surface du bas

Absorption sur la face latérale (lateral absorption)																
Temps [h]	Masses [g]	LA1	LA2	LA3	Masse d'eau absorbée [g]	LA1	LA2	LA3	Moyenne	Ecart-type	Capillary absorption CA [kg/m ²]	LA1	LA2	LA3	Moyenne	Ecart-type
0	Début	405,09	401,80	402,96	Début						Début					
0,2	12 minutes	406,76	403,5	404,69	12 minutes	1,67	1,70	1,73	1,70	0,03	12 minutes	0,261	0,266	0,270	0,266	0,005
0,5	30 minutes	407,22	403,88	405,08	30 minutes	2,13	2,08	2,12	2,11	0,03	30 minutes	0,333	0,325	0,331	0,330	0,004
1	1 heure	407,64	404,27	405,57	1 heure	2,55	2,47	2,61	2,54	0,07	1 heure	0,398	0,386	0,408	0,397	0,011
2	2 heures	407,95	404,6	405,93	2 heures	2,86	2,80	2,97	2,88	0,09	2 heures	0,447	0,438	0,464	0,449	0,013
4	4 heures	408,4	404,94	406,3	4 heures	3,31	3,14	3,34	3,26	0,11	4 heures	0,517	0,491	0,522	0,510	0,017
24	1 jour	409,93	406,37	407,86	1 jour	4,84	4,57	4,90	4,77	0,18	1 jour	0,756	0,714	0,766	0,745	0,027
48	2 jours	410,95	407,37	408,83	2 jours	5,86	5,57	5,87	5,77	0,17	2 jours	0,916	0,870	0,917	0,901	0,027
72	3 jours	411,67	408,16	409,66	3 jours	6,58	6,36	6,70	6,55	0,17	3 jours	1,028	0,994	1,047	1,023	0,027
96	4 jours	412,35	408,8	410,3	4 jours	7,26	7,00	7,34	7,20	0,18	4 jours	1,134	1,094	1,147	1,125	0,028
240	10 jours	414,89	411,35	412,73	10 jours	9,80	9,55	9,77	9,71	0,14	10 jours	1,531	1,492	1,527	1,517	0,021

FIGURE 21 – Absorption d'eau par la surface latérale

Absorption sur la face verticale (vertical absorption)																
Temps [h]	Masses [g]	VA1	VA2	VA3	Masse d'eau absorbée [g]	VA1	VA2	VA3	Moyenne	Ecart-type	Capillary absorption CA [kg/m ²]	VA1	VA2	VA3	Moyenne	Ecart-type
0	Début	517,44	513,7	509,16	Début						Début					
0,2	12 minutes	517,88	514,15	509,64	12 minutes	0,44	0,45	0,48	0,46	0,02	12 minutes	0,275	0,281	0,300	0,285	0,013
0,5	30 minutes	518,04	514,29	509,78	30 minutes	0,6	0,59	0,62	0,60	0,02	30 minutes	0,375	0,369	0,387	0,377	0,010
1	1 heure	518,16	514,42	509,93	1 heure	0,72	0,72	0,77	0,74	0,03	1 heure	0,450	0,450	0,481	0,460	0,018
2	2 heures	518,3	514,55	510,07	2 heures	0,86	0,85	0,91	0,87	0,03	2 heures	0,537	0,531	0,569	0,546	0,020
4	4 heures	518,51	514,76	510,27	4 heures	1,07	1,06	1,11	1,08	0,03	4 heures	0,669	0,662	0,694	0,675	0,017
24	1 jour	519,74	515,93	511,45	1 jour	2,3	2,23	2,29	2,27	0,04	1 jour	1,437	1,394	1,431	1,421	0,024
48	2 jours	520,75	516,93	512,45	2 jours	3,31	3,23	3,29	3,28	0,04	2 jours	2,069	2,019	2,056	2,048	0,026
72	3 jours	521,6	517,77	513,27	3 jours	4,16	4,07	4,11	4,11	0,05	3 jours	2,600	2,544	2,569	2,571	0,028
96	4 jours	522,29	518,47	514,03	4 jours	4,85	4,77	4,87	4,83	0,05	4 jours	3,031	2,981	3,044	3,019	0,033
240	10 jours	525,21	521,5	516,95	10 jours	7,77	7,8	7,79	7,79	0,02	10 jours	4,856	4,875	4,869	4,867	0,010

FIGURE 22 – Absorption d'eau par la surface verticale

A.7.3 Échantillons imprimés, sable recyclé

Absorption dans le sens de pose																
Temps [h]	Masses [g]	Parallèle 1	Parallèle 2	Parallèle 3	Masse d'eau absorbée [g]	Parallèle 1	Parallèle 2	Parallèle 3	Moyenne	Ecart-type	Capillary absorption CA [kg/m ²]	Parallèle 1	Parallèle 2	Parallèle 3	Moyenne	Ecart-type
0	Début	563,89	564,29	563,85	Début						Début					
0,2	12 minutes	564,38	564,79	564,4	12 minutes	0,49	0,50	0,55	0,51	0,03	12 minutes	0,077	0,078	0,086	0,080	0,005
0,5	30 minutes	564,53	564,98	564,56	30 minutes	0,64	0,69	0,71	0,68	0,04	30 minutes	0,100	0,108	0,111	0,106	0,006
1	1 heure	564,66	565,13	564,7	1 heure	0,77	0,84	0,85	0,82	0,04	1 heure	0,120	0,131	0,133	0,128	0,007
2	2 heures	564,92	565,41	565	2 heures	1,03	1,12	1,15	1,10	0,06	2 heures	0,161	0,175	0,180	0,172	0,010
4	4 heures	565,17	565,78	565,32	4 heures	1,28	1,49	1,47	1,41	0,12	4 heures	0,200	0,233	0,230	0,221	0,018
24	1 jour	566,81	567,54	566,96	1 jour	2,92	3,25	3,11	3,09	0,17	1 jour	0,456	0,508	0,486	0,483	0,026
48	2 jours	567,6	568,41	567,75	2 jours	3,71	4,12	3,90	3,91	0,21	2 jours	0,580	0,644	0,609	0,611	0,032
72	3 jours	568,95	569,97	569,12	3 jours	5,06	5,68	5,27	5,34	0,32	3 jours	0,791	0,888	0,823	0,834	0,049
96	4 jours	569,19	570,27	569,34	4 jours	5,30	5,98	5,49	5,59	0,35	4 jours	0,828	0,934	0,858	0,873	0,055
168	7 jours	569,46	570,47	569,59	7 jours	5,57	6,18	5,74	5,83	0,31	7 jours	0,870	0,966	0,897	0,911	0,049

FIGURE 23 – Absorption d'eau des échantillons placés dans le sens de pose

Absorption dans le sens perpendiculaire à la pose																
Temps [h]	Masses [g]	Perpendiculaire 1	Perpendiculaire 2	Perpendiculaire 3	Masse d'eau absorbée [g]	Perpendiculaire 1	Perpendiculaire 2	Perpendiculaire 3	Moyenne	Ecart-type	Capillary absorption CA [kg/m ²]	Perpendiculaire 1	Perpendiculaire 2	Perpendiculaire 3	Moyenne	Ecart-type
0	Début	556,82	564,35	560,15	Début						Début					
0,2	12 minutes	557,41	564,93	560,73	12 minutes	0,59	0,58	0,58	0,58	0,01	12 minutes	0,092	0,091	0,091	0,091	0,001
0,5	30 minutes	557,63	565,13	560,9	30 minutes	0,81	0,78	0,75	0,78	0,03	30 minutes	0,127	0,122	0,117	0,122	0,005
1	1 heure	557,81	565,27	561,05	1 heure	0,99	0,92	0,90	0,94	0,05	1 heure	0,155	0,144	0,141	0,146	0,007
2	2 heures	558,13	565,57	561,33	2 heures	1,31	1,22	1,18	1,24	0,07	2 heures	0,205	0,191	0,184	0,193	0,010
4	4 heures	558,47	565,89	561,66	4 heures	1,65	1,54	1,51	1,57	0,07	4 heures	0,258	0,241	0,236	0,245	0,012
24	1 jour	560,05	567,52	563,18	1 jour	3,23	3,17	3,03	3,14	0,10	1 jour	0,505	0,495	0,473	0,491	0,016
48	2 jours	560,8	568,27	563,95	2 jours	3,98	3,92	3,80	3,90	0,09	2 jours	0,622	0,612	0,594	0,609	0,014
72	3 jours	562,09	569,47	565,15	3 jours	5,27	5,12	5,00	5,13	0,14	3 jours	0,823	0,800	0,781	0,802	0,021
96	4 jours	562,35	569,73	565,44	4 jours	5,53	5,38	5,29	5,40	0,12	4 jours	0,864	0,841	0,827	0,844	0,019
168	7 jours	562,58	569,98	565,68	7 jours	5,76	5,63	5,53	5,64	0,12	7 jours	0,900	0,880	0,864	0,881	0,018

FIGURE 24 – Absorption d'eau des échantillons placés dans le sens perpendiculaire à la pose

A.7.4 Échantillons moulés, sable recyclé, avec peinture sur les autres faces

Absorption sur la face du bas (bottom absorption)																			
Temps [h]	Masses [g]	BA1	BA2	BA3	Masse d'eau absorbée [g]						Capillary absorption CA [kg/m ²]								
						BA1	BA2	BA3	Moyenne	Ecart-type	Début	BA1	BA2	BA3	Moyenne	Ecart-type			
0	Début	410,56	407,66	369,07	Début														
0,2	12 minutes	412,56	409,57	370,41	12 minutes	2	1,91	1,34	1,75	0,36	12 minutes	0,313	0,298	0,209	0,273	0,056			
0,5	30 minutes	413,15	410,14	370,84	30 minutes	2,59	2,48	1,77	2,28	0,45	30 minutes	0,405	0,387	0,277	0,356	0,070			
1	1 heure	413,75	410,78	371,26	1 heure	3,19	3,12	2,19	2,83	0,56	1 heure	0,498	0,487	0,342	0,443	0,087			
2	2 heures	414,32	411,25	371,66	2 heures	3,76	3,59	2,59	3,31	0,63	2 heures	0,587	0,561	0,405	0,518	0,099			
3	3 heures	414,61	411,61	372,02	3 heures	4,05	3,95	2,95	3,65	0,61	3 heures	0,633	0,617	0,461	0,570	0,095			
4	4 heures	414,8	411,83	372,18	4 heures	4,24	4,17	3,11	3,84	0,63	4 heures	0,663	0,652	0,486	0,600	0,099			
24	1 jour	416,09	413,03	373,36	1 jour	5,53	5,37	4,29	5,06	0,67	1 jour	0,864	0,839	0,670	0,791	0,105			
48	2 jours	416,59	413,49	373,97	2 jours	6,03	5,83	4,9	5,59	0,60	2 jours	0,942	0,911	0,766	0,873	0,094			
120	5 jours	417,42	414,3	374,77	5 jours	6,86	6,64	5,7	6,40	0,62	5 jours	1,072	1,038	0,891	1,000	0,096			
168	7 jours	417,82	414,63	375,22	7 jours	7,26	6,97	6,15	6,79	0,58	7 jours	1,134	1,089	0,961	1,061	0,090			

FIGURE 25 – Absorption d'eau par la surface du bas

Absorption sur la face latérale (lateral absorption)																			
Temps [h]	Masses [g]	LA1	LA2	LA3	Masse d'eau absorbée [g]						Capillary absorption CA [kg/m ²]								
						LA1	LA2	LA3	Moyenne	Ecart-type	Début	LA1	LA2	LA3	Moyenne	Ecart-type			
0	Début	386,14	396,89	384,61	Début														
0,2	12 minutes	387,87	398,85	386,55	12 minutes	1,73	1,96	1,94	1,88	0,13	12 minutes	0,270	0,306	0,303	0,293	0,020			
0,5	30 minutes	388,32	399,47	387,07	30 minutes	2,18	2,58	2,46	2,41	0,21	30 minutes	0,341	0,403	0,384	0,376	0,032			
1	1 heure	388,84	400,13	387,55	1 heure	2,7	3,24	2,94	2,96	0,27	1 heure	0,422	0,506	0,459	0,463	0,042			
2	2 heures	389,31	400,73	388,08	2 heures	3,17	3,84	3,47	3,49	0,34	2 heures	0,495	0,600	0,542	0,546	0,052			
3	3 heures	389,72	401,06	388,42	3 heures	3,58	4,17	3,81	3,85	0,30	3 heures	0,559	0,652	0,595	0,602	0,046			
4	4 heures	389,84	401,34	388,68	4 heures	3,7	4,45	4,07	4,07	0,38	4 heures	0,578	0,695	0,636	0,636	0,059			
24	1 jour	391,2	402,86	389,97	1 jour	5,06	5,97	5,36	5,46	0,46	1 jour	0,791	0,933	0,838	0,854	0,072			
48	2 jours	391,85	403,46	390,95	2 jours	5,71	6,57	6,34	6,21	0,45	2 jours	0,892	1,027	0,991	0,970	0,070			
120	5 jours	392,71	404,34	391,45	5 jours	6,57	7,45	6,84	6,95	0,45	5 jours	1,027	1,164	1,069	1,086	0,070			
168	7 jours	393,18	404,78	391,87	7 jours	7,04	7,89	7,26	7,40	0,44	7 jours	1,100	1,233	1,134	1,156	0,069			

FIGURE 26 – Absorption d'eau par la surface latérale

Absorption sur la face verticale (vertical absorption)																			
Temps [h]	Masses [g]	VA1	VA2	VA3	Masse d'eau absorbée [g]						Capillary absorption CA [kg/m ²]								
						VA1	VA2	VA3	Moyenne	Ecart-type	Début	VA1	VA2	VA3	Moyenne	Ecart-type			
0	Début	506,25	518,04	526,46	Début														
0,2	12 minutes	506,58	518,52	526,94	12 minutes	0,33	0,48	0,48	0,43	0,09	12 minutes	0,206	0,300	0,300	0,269	0,054			
0,5	30 minutes	506,69	518,66	527,1	30 minutes	0,44	0,62	0,64	0,57	0,11	30 minutes	0,275	0,388	0,400	0,354	0,069			
1	1 heure	506,82	518,83	527,26	1 heure	0,57	0,79	0,8	0,72	0,13	1 heure	0,356	0,494	0,500	0,450	0,081			
2	2 heures	506,91	518,97	527,39	2 heures	0,66	0,93	0,93	0,84	0,16	2 heures	0,413	0,581	0,581	0,525	0,097			
3	3 heures	507,01	519,06	527,49	3 heures	0,76	1,02	1,03	0,94	0,15	3 heures	0,475	0,637	0,644	0,585	0,096			
4	4 heures	507,08	519,12	527,56	4 heures	0,83	1,08	1,1	1,00	0,15	4 heures	0,519	0,675	0,687	0,627	0,094			
24	1 jour	507,5	519,55	527,96	1 jour	1,25	1,51	1,5	1,42	0,15	1 jour	0,781	0,944	0,938	0,887	0,092			
48	2 jours	507,69	519,71	528,12	2 jours	1,44	1,67	1,66	1,59	0,13	2 jours	0,900	1,044	1,037	0,994	0,081			
120	5 jours	507,99	520,03	528,43	5 jours	1,74	1,99	1,97	1,90	0,14	5 jours	1,088	1,244	1,231	1,187	0,087			
168	7 jours	508,13	520,18	528,58	7 jours	1,88	2,14	2,12	2,05	0,14	7 jours	1,175	1,337	1,325	1,279	0,090			

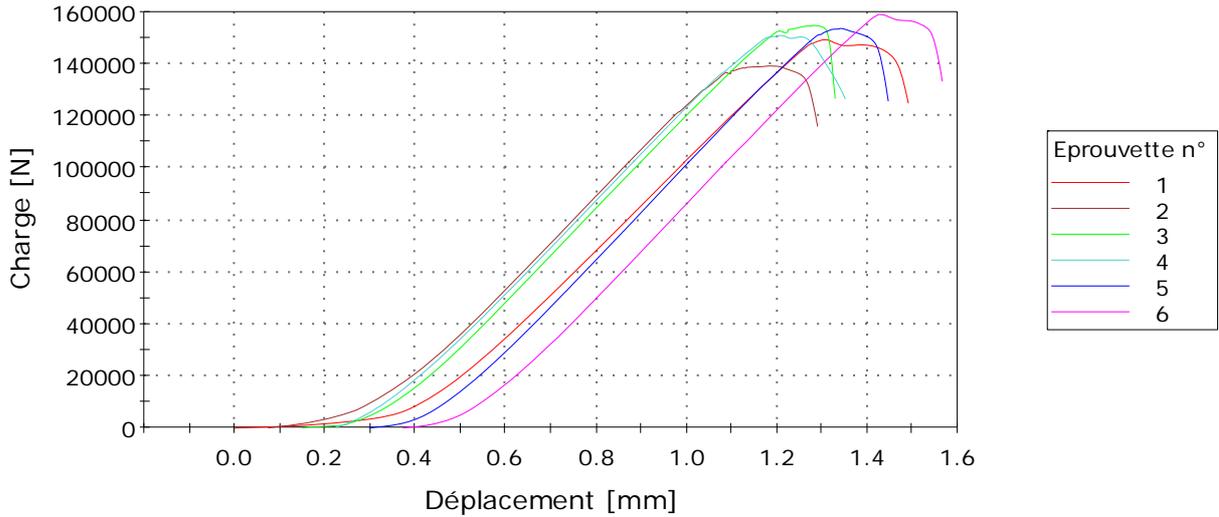
FIGURE 27 – Absorption d'eau par la surface verticale

A.8 Résultats des essais de carbonatation accélérée

A.8.1 Échantillons moulés, sable naturel, résistances en compression et en flexion

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	YV
Date	31/05/23
Température (°C)	24,1
Humidité (%)	43,3
Etat	0 jours
Type	CA_bv

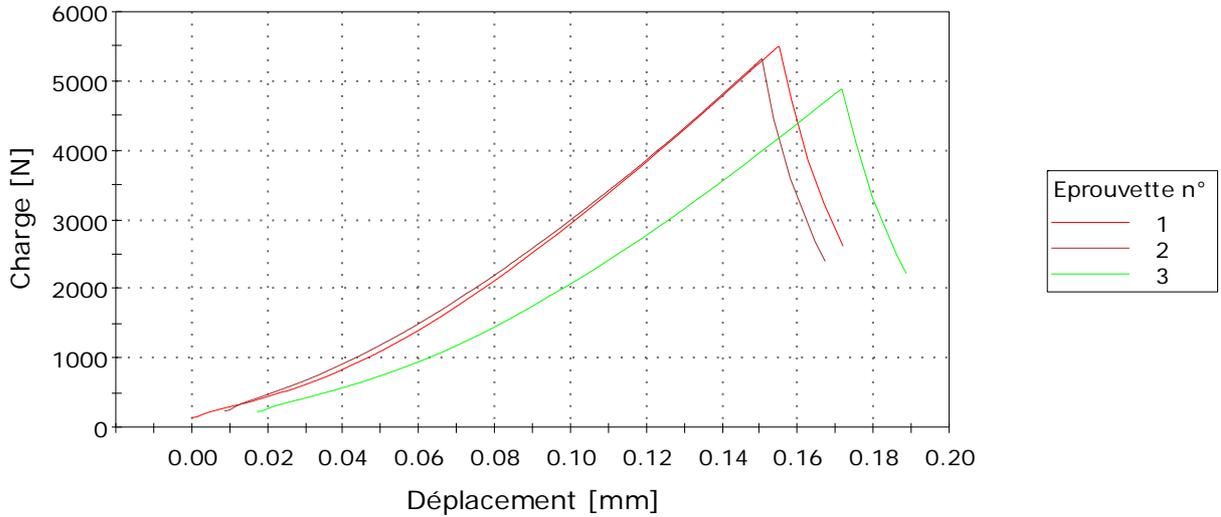
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	149187	93,24
	2	40,00	40,00	40,00	139152	86,97
	3	40,00	40,00	40,00	154706	96,69
	4	40,00	40,00	40,00	150869	94,29
	5	40,00	40,00	40,00	153533	95,96
	6	40,00	40,00	40,00	158904	99,31
Moy.		40,00	40,00	40,00	151059	94,41
E-T		0,00	0,00	0,00	6727,23	4,20

Rapport n°	Yeakleang
Date	31/05/23
Opérateur	YV
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	23,8
Humidité relative (%)	40,2
Type	CA_bv
Etat	0 jours

Eprouvette 1 à 3

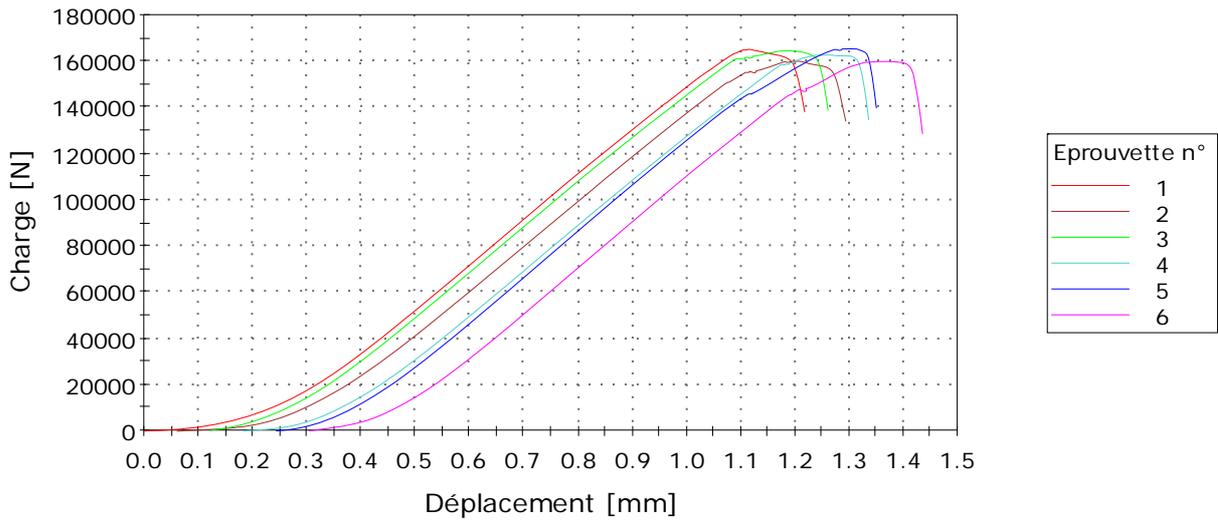


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	160,0	40,1	40,2	568,69	5497,9	12,75
	2	160,0	40,1	40,1	570,35	5320,5	12,41
	3	160,0	40,2	40,1	571,22	4885,2	11,34
Moyenne		160,0	40,1	40,1	570,09	5234,5	12,17
Ecart-type		0,0	0,1	0,0	1,3	315,2	0,7

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	12,74	2206
2	12,41	2221
3	11,39	2215
Moyenne	12,18	2214
Ecart-type	0,7	7,7

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	YV
Date	07/06/23
Température (°C)	24,5
Humidité (%)	49,7
Etat	90 jours
Type	CA-7_SB

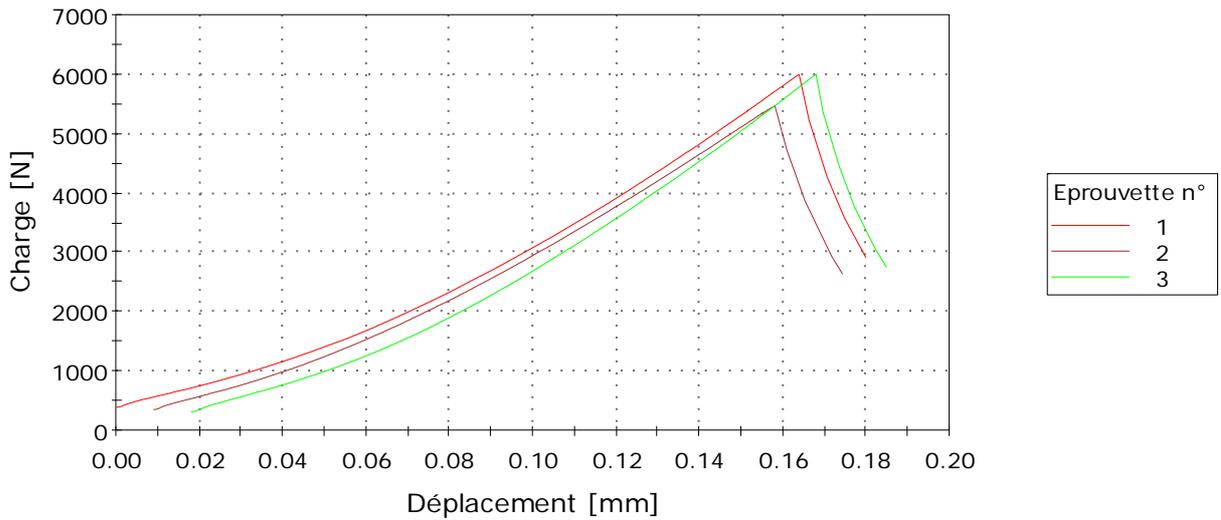
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	165038	103,15
	2	40,00	40,00	40,00	159802	99,88
	3	40,00	40,00	40,00	164427	102,77
	4	40,00	40,00	40,00	162607	101,63
	5	40,00	40,00	40,00	165284	103,30
	6	40,00	40,00	40,00	159807	99,88
Moy.		40,00	40,00	40,00	162827	101,77
E-T		0,00	0,00	0,00	2522,12	1,58

Rapport n°	Yeakleang
Date	07/06/23
Opérateur	YV
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	24,3
Humidité relative (%)	44,9
Type	CA-7_SB
Etat	19-04

Eprouvette 1 à 3

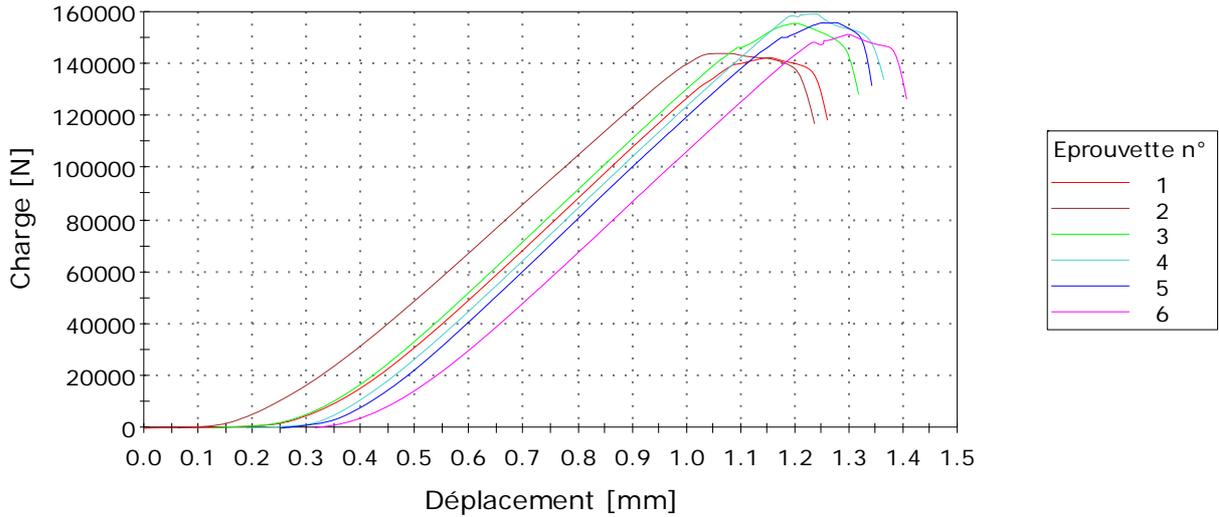


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	160,0	40,3	40,2	579,27	5993,9	13,82
	2	160,0	40,2	40,1	575,44	5463,4	12,68
	3	160,0	40,1	39,9	573,23	6001,1	14,07
Moyenne		160,0	40,2	40,1	575,98	5819,5	13,52
Ecart-type		0,0	0,1	0,1	3,1	308,4	0,7

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	13,87	2235
2	12,70	2233
3	14,13	2236
Moyenne	13,57	2235
Ecart-type	0,8	1,9

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	YV
Date	28/06/23
Température (°C)	24,6
Humidité (%)	44,5
Etat	19-04
Type	CA-28_SB

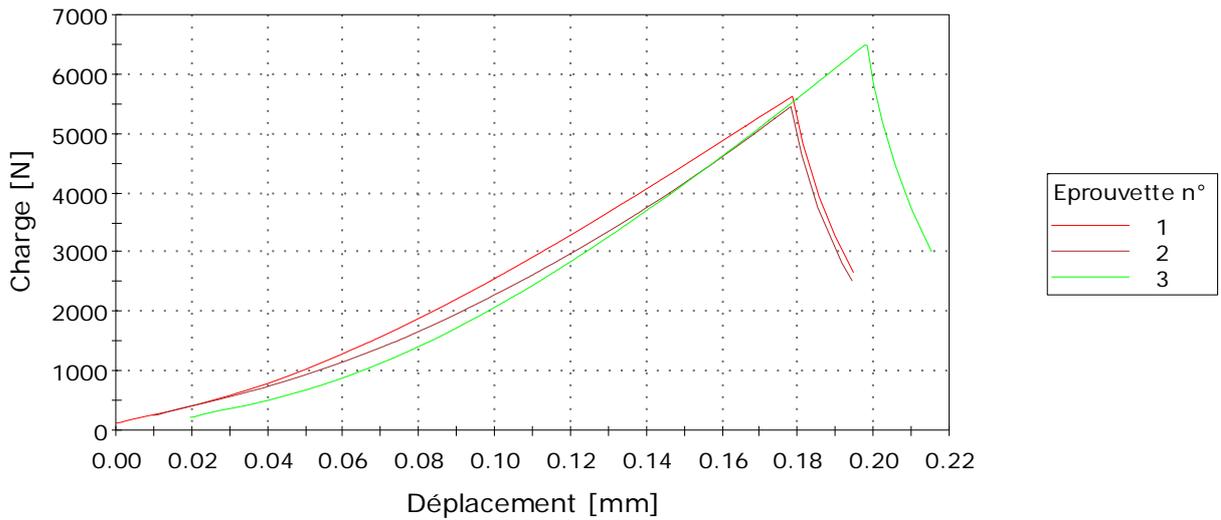
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]	
	1	1a	40,00	40,00	40,00	142331	88,96
	2	1b	40,00	40,00	40,00	143898	89,94
	3	2a	40,00	40,00	40,00	155463	97,16
	4	2b	40,00	40,00	40,00	159144	99,46
	5	3a	40,00	40,00	40,00	155758	97,35
	6	3b	40,00	40,00	40,00	151263	94,54
Moy.			40,00	40,00	40,00	151310	94,57
E-T			0,00	0,00	0,00	6840,56	4,28

Rapport n°	Yeakleang
Date	28/06/23
Opérateur	YV
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	24,1
Humidité relative (%)	45,3
Type	CA-28_SB
Etat	19/04

Eprouvette 1 à 3

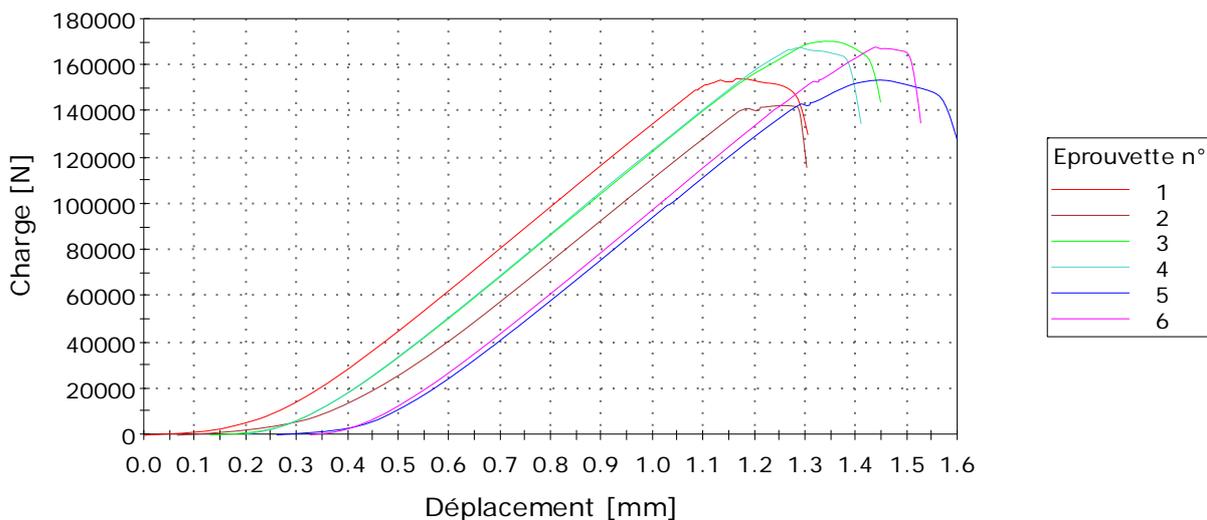


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	160,0	40,6	40,0	568,53	5630,2	12,99
	2	160,0	40,3	40,1	573,15	5459,4	12,61
	3	160,0	40,1	39,9	570,53	6492,6	15,26
Moyenne		160,0	40,4	40,0	570,74	5860,7	13,62
Ecart-type		0,0	0,2	0,1	2,3	553,9	1,4

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	13,19	2187
2	12,68	2214
3	15,35	2228
Moyenne	13,74	2210
Ecart-type	1,4	20,9

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	YV
Date	08/08/23
Température (°C)	23,9
Humidité (%)	45,7
Etat	CA_bvc
Type	56 jours

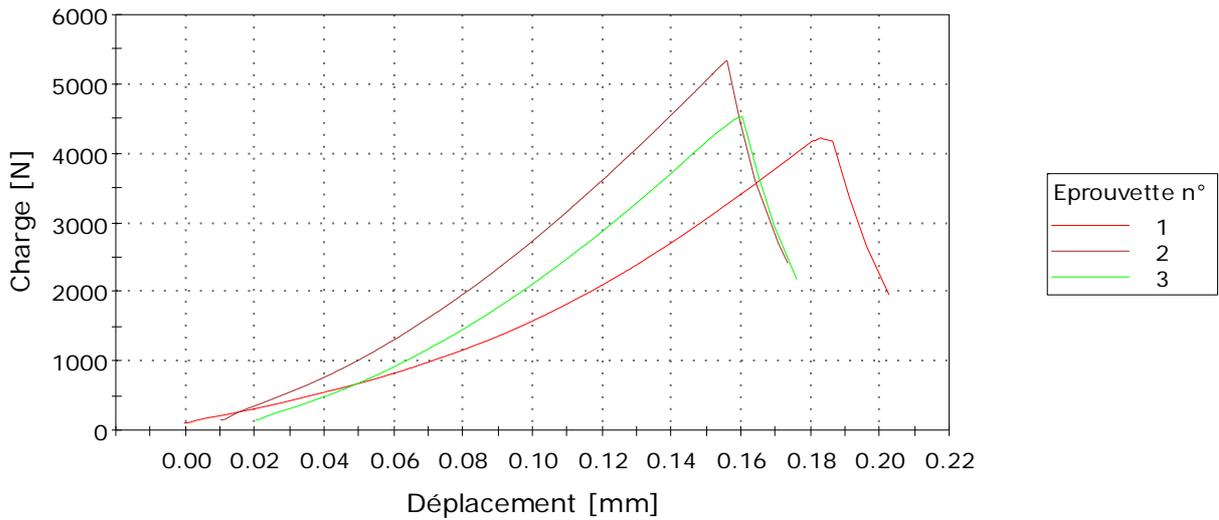
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	39,83	40,00	154069	96,70
	2	40,00	39,83	40,00	142483	89,43
	3	40,00	40,00	40,00	170269	106,42
	4	40,00	40,00	40,00	167608	104,76
	5	40,00	40,00	40,00	153541	95,96
	6	40,00	40,00	40,00	167738	104,84
Moy.		40,00	39,94	40,00	159285	99,68
E-T		0,00	0,09	0,00	10989,73	6,71

Rapport n°	Yeakleang
Date	08/08/23
Opérateur	YV
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	23,6
Humidité relative (%)	46,0
Type	CA_bvc
Etat	56 jours

Eprouvette 1 à 3



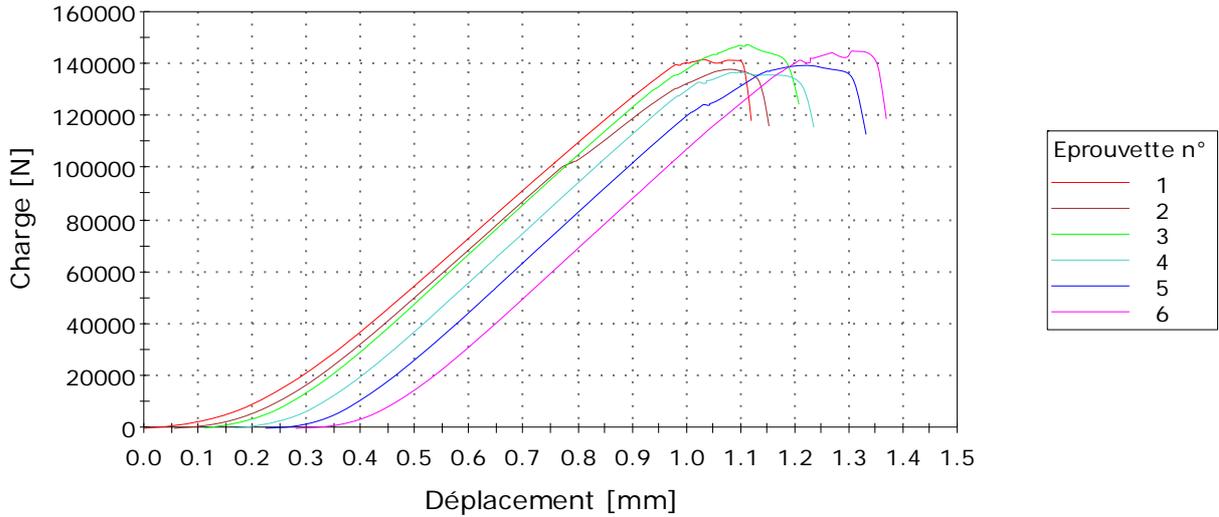
	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	160,0	39,8	40,1	555,81	4227,1	9,91
	2	160,0	40,1	39,9	559,90	5334,5	12,52
	3	160,0	40,1	40,1	560,86	4533,1	10,56
Moyenne		160,0	40,0	40,0	558,86	4698,2	11,00
Ecart-type		0,0	0,1	0,1	2,7	571,8	1,4

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	9,86	2177
2	12,56	2187
3	10,56	2183
Moyenne	10,99	2182
Ecart-type	1,4	5,0

A.8.2 Échantillons moulés, sable recyclé, résistances en compression et en flexion

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	YV
Date	24/05/23
Température (°C)	23,6
Humidité (%)	44,5
Etat	12-04
Type	CA_0_TV

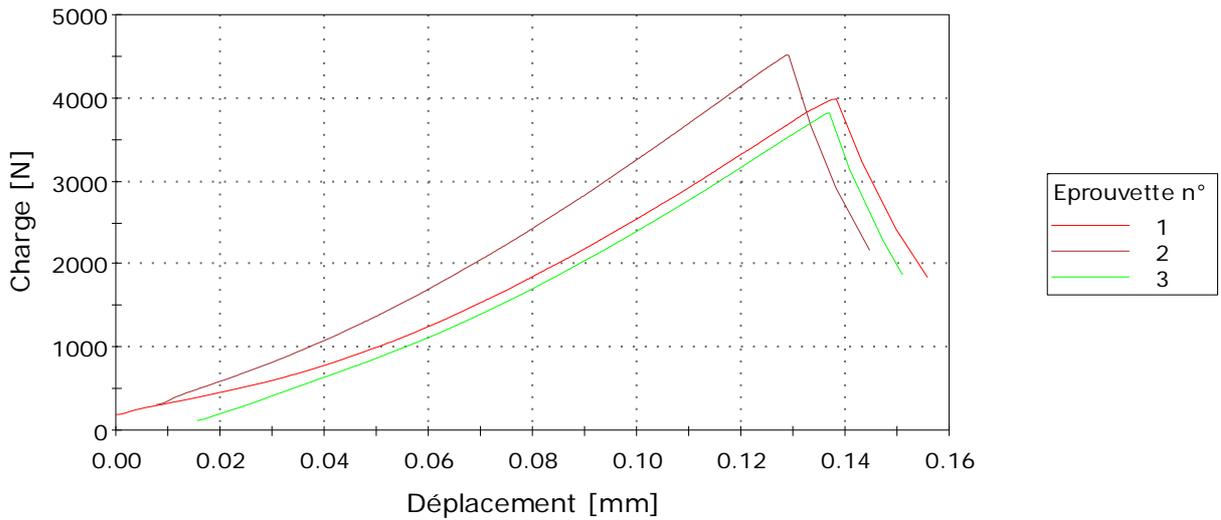
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	141632	88,52
	2	40,00	40,00	40,00	137909	86,19
	3	40,00	39,94	40,00	147439	92,29
	4	40,00	39,94	40,00	136752	85,60
	5	40,00	40,00	40,00	139320	87,07
	6	40,00	40,00	40,00	144913	90,57
Moy.		40,00	39,98	40,00	141328	88,37
E-T		0,00	0,03	0,00	4170,09	2,62

Rapport n°	Yeakleang
Date	24/05/23
Opérateur	YV
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	22,9
Humidité relative (%)	50,5
Type	CA 0 TV
Etat	12-04

Eprouvette 1 à 3

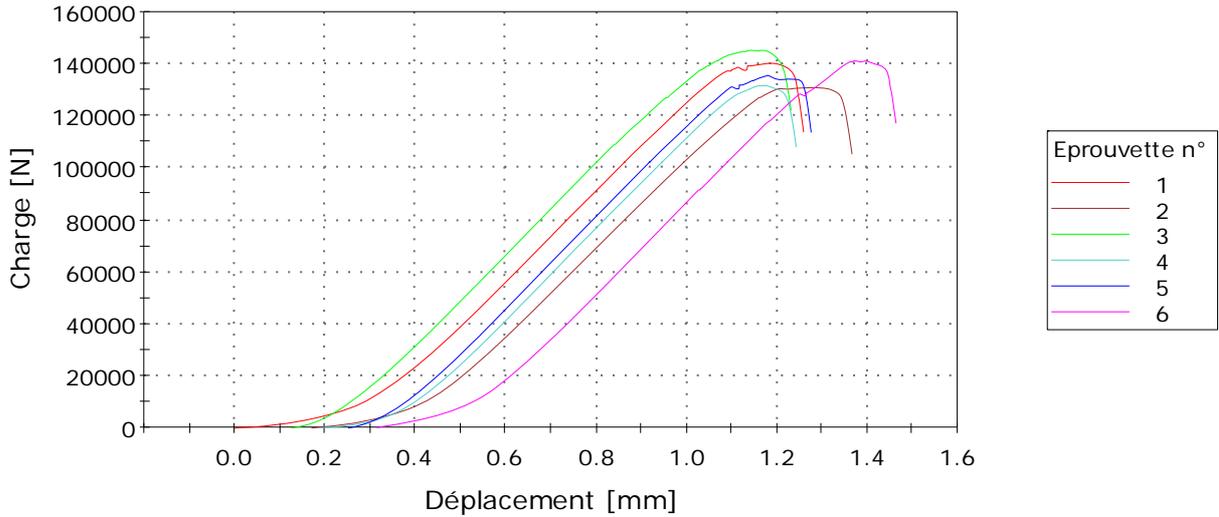


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	160,0	40,1	40,4	551,52	3989,0	9,14
	2	160,0	39,9	40,2	550,54	4516,8	10,50
	3	160,0	40,0	40,0	552,52	3819,8	8,95
Moyenne		160,0	40,0	40,2	551,53	4108,6	9,53
Ecart-type		0,0	0,1	0,2	1,0	363,5	0,8

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	9,09	2127
2	10,44	2144
3	8,95	2158
Moyenne	9,49	2143
Ecart-type	0,8	15,3

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	YV
Date	31/05/23
Température (°C)	24,1
Humidité (%)	43,3
Etat	7 jours
Type	CA_tv

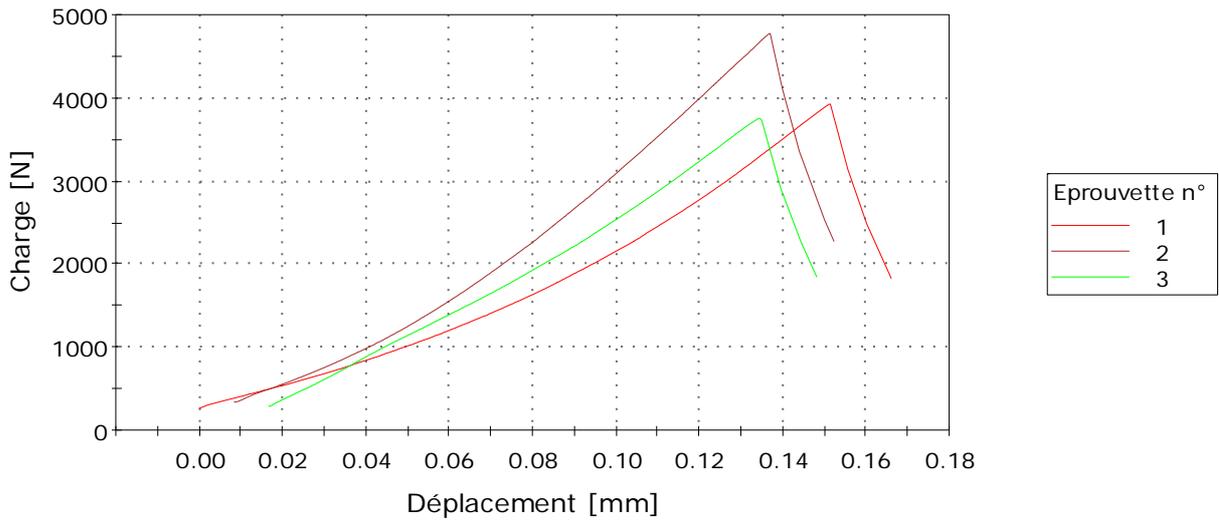
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	39,83	40,00	140163	87,98
	2	40,00	39,83	40,00	130897	82,16
	3	40,00	40,00	40,00	145185	90,74
	4	40,00	40,00	40,00	131689	82,31
	5	40,00	40,00	40,00	135518	84,70
	6	40,00	40,00	40,00	141067	88,17
Moy.		40,00	39,94	40,00	137420	86,01
E-T		0,00	0,09	0,00	5659,22	3,50

Rapport n°	Yeakleang
Date	31/05/23
Opérateur	YV
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	24,0
Humidité relative (%)	41,9
Type	CA_tv
Etat	7 jours

Eprouvette 1 à 3

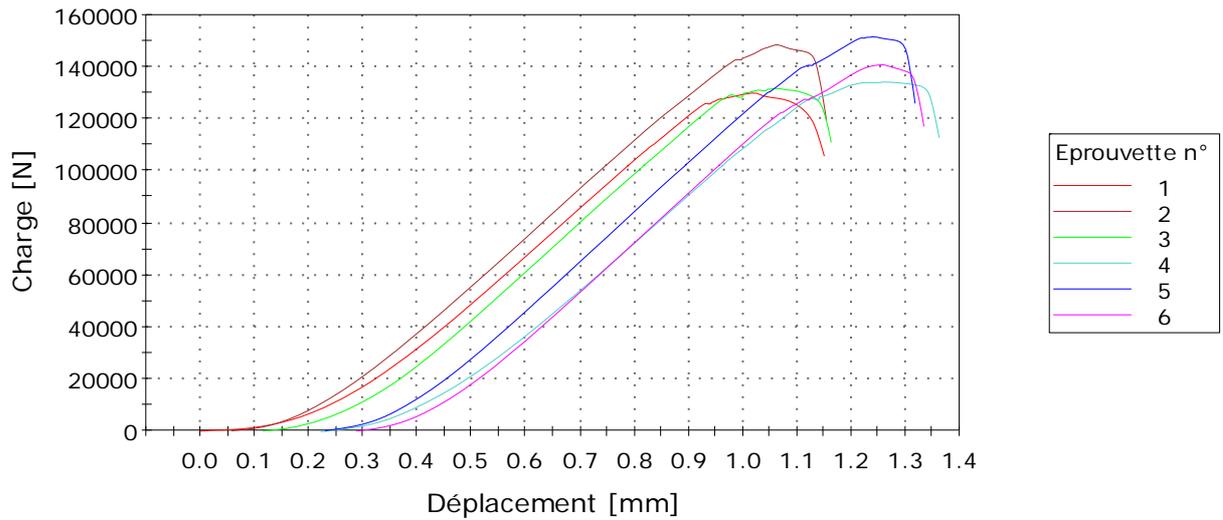


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	160,0	39,8	40,2	544,02	3926,1	9,17
	2	160,0	40,0	40,0	546,11	4774,3	11,18
	3	160,0	40,0	40,0	551,14	3757,7	8,79
Moyenne		160,0	40,0	40,1	547,09	4152,7	9,71
Ecart-type		0,0	0,1	0,1	3,7	544,9	1,3

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	9,09	2126
2	11,19	2131
3	8,78	2150
Moyenne	9,69	2136
Ecart-type	1,3	12,9

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	YV
Date	21/06/23
Température (°C)	25,1
Humidité (%)	50,0
Etat	28 jours
Type	CA_tv

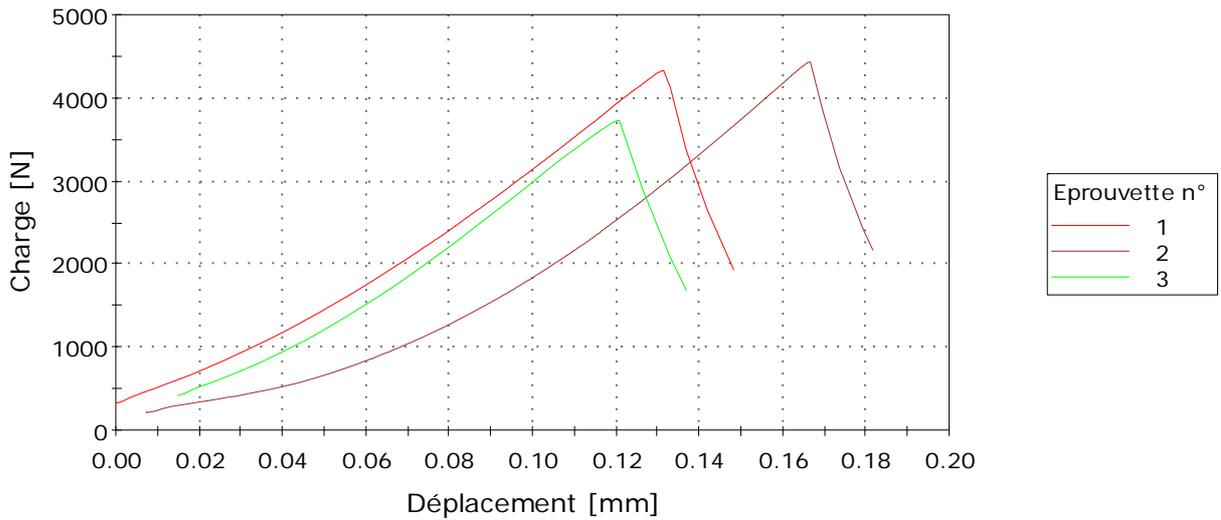
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	129921	81,20
	2	40,00	40,00	40,00	148423	92,76
	3	40,00	40,00	40,00	131684	82,30
	4	40,00	40,00	40,00	134124	83,83
	5	40,00	40,00	40,00	151461	94,66
	6	40,00	40,00	40,00	140704	87,94
Moy.		40,00	40,00	40,00	139386	87,12
E-T		0,00	0,00	0,00	9008,83	5,63

Rapport n°	Yeakleang
Date	21/06/23
Opérateur	YV
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	24,9
Humidité relative (%)	49,7
Type	CA_tv
Etat	28 jours

Eprouvette 1 à 3

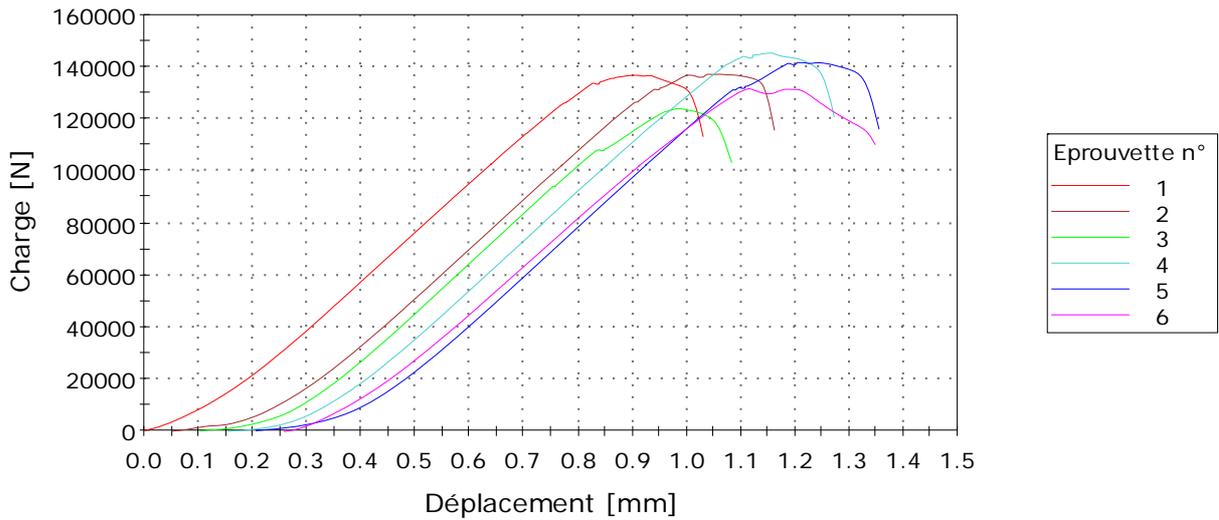


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	160,0	40,2	40,0	553,18	4326,7	10,10
	2	160,0	40,2	40,1	551,81	4430,8	10,29
	3	160,0	40,2	40,0	555,79	3729,8	8,70
Moyenne		160,0	40,2	40,0	553,59	4162,5	9,70
Ecart-type		0,0	0,0	0,0	2,0	378,3	0,9

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	10,14	2152
2	10,32	2140
3	8,74	2161
Moyenne	9,73	2151
Ecart-type	0,9	10,7

N° Rapport	Aris
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	ADA
Date	19/07/23
Température (°C)	24,5
Humidité (%)	43,5
Etat	56 jours
Type	CA-tvc

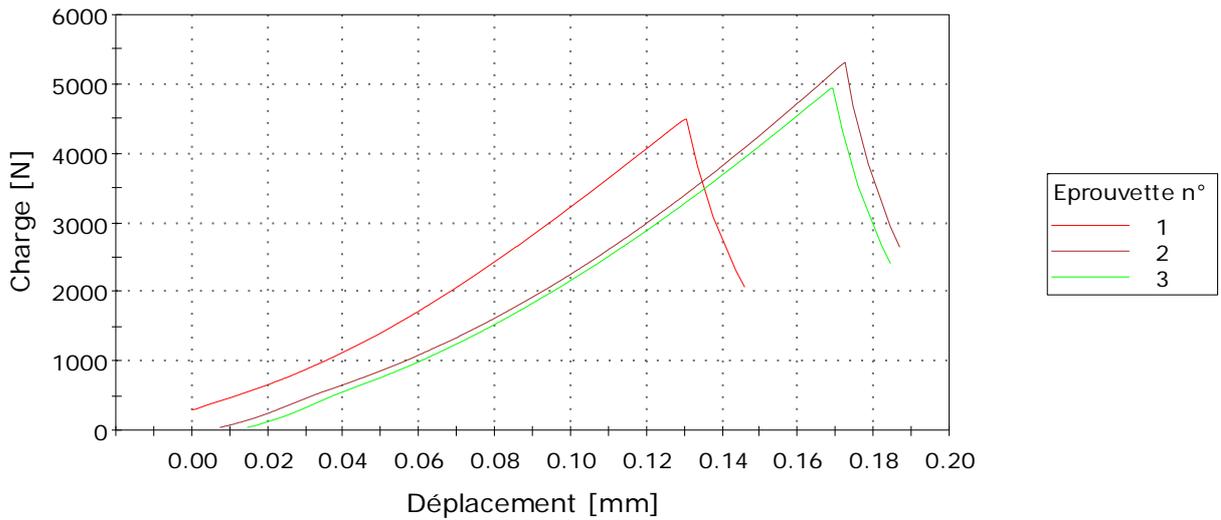
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	136742	85,46
	2	40,00	40,00	40,00	137127	85,70
	3	40,00	40,00	40,00	123971	77,48
	4	40,00	40,00	40,00	145339	90,84
	5	40,00	40,00	40,00	141657	88,54
	6	40,00	40,00	40,00	131604	82,25
	Moy.	40,00	40,00	40,00	136074	85,05
	E-T	0,00	0,00	0,00	7550,15	4,72

Rapport n°	Yeakleang
Date	19/07/23
Opérateur	ADA
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	24,5
Humidité relative (%)	43,4
Type	CA-tvc
Etat	56 jours

Eprouvette 1 à 3



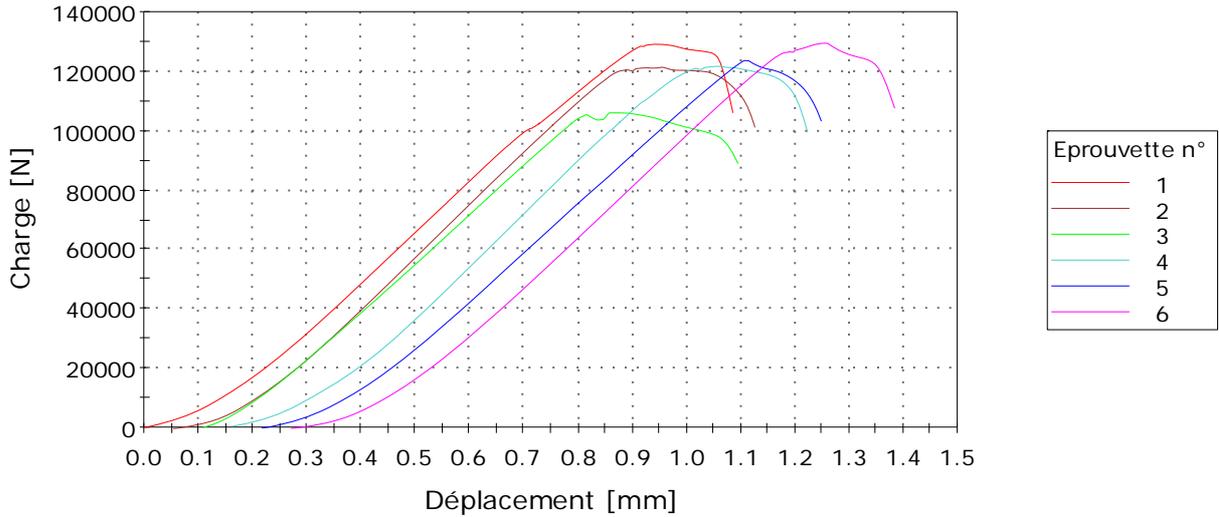
N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
1	160,0	39,7	40,0	545,77	4498,2	10,62
2	160,0	40,0	40,0	546,07	5310,6	12,45
3	160,0	39,7	40,0	546,95	4943,5	11,67
Moyenne	160,0	39,8	40,0	546,26	4917,4	11,58
Ecart-type	0,0	0,2	0,0	0,6	406,8	0,9

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	10,54	2148
2	12,45	2133
3	11,59	2153
Moyenne	11,53	2145
Ecart-type	1,0	10,2

A.8.3 Échantillons imprimés, sable recyclé, résistances en compression et en flexion

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	ADA
Date	16/05/23
Température (°C)	23
Humidité (%)	50
Etat	0 jours
Type	Limelette CA sens de pose

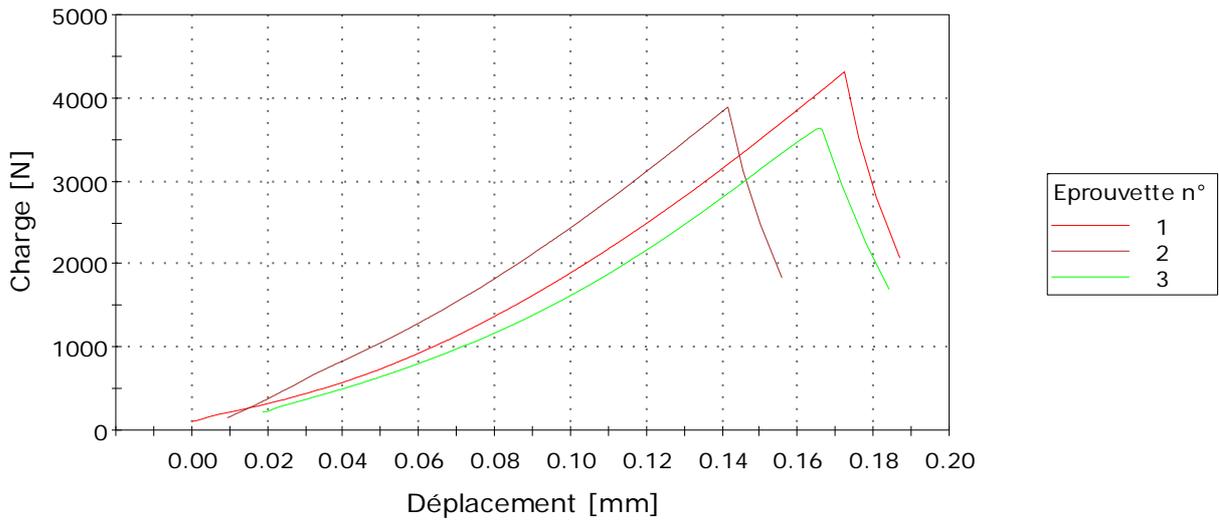
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	129034	80,65
	2	40,00	40,00	40,00	121308	75,82
	3	40,00	40,00	40,00	105998	66,25
	4	40,00	40,00	40,00	121650	76,03
	5	40,00	40,00	40,00	123569	77,23
	6	40,00	40,00	40,00	129472	80,92
	Moy.	40,00	40,00	40,00	121838	76,15
	E-T	0,00	0,00	0,00	8535,67	5,33

Rapport n°	Yeakleang
Date	16/05/23
Opérateur	ADA
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	23,3
Humidité relative (%)	39,8
Type	sens perpendiculaire à la pose
Etat	0 jours

Eprouvette 1 à 3

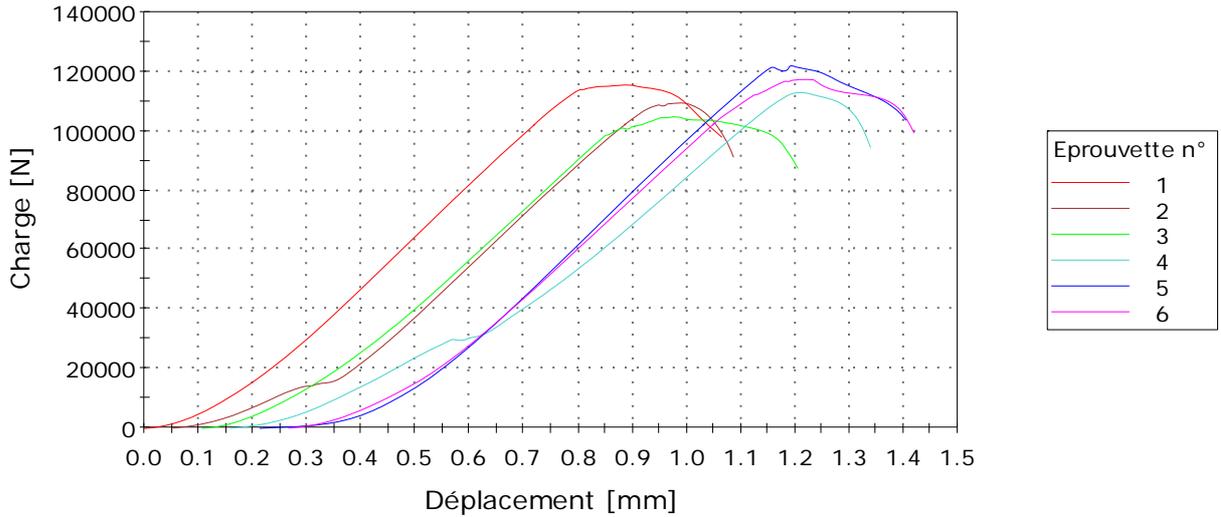


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	160,0	40,0	39,7	537,28	4315,5	10,26
	2	160,0	40,2	39,5	539,18	3894,8	9,32
	3	160,0	40,3	40,5	556,74	3639,4	8,27
Moyenne		160,0	40,2	39,9	544,40	3949,9	9,29
Ecart-type		0,0	0,2	0,5	10,7	341,4	1,0

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	10,34	2114
2	9,51	2122
3	8,24	2134
Moyenne	9,36	2123
Ecart-type	1,1	9,8

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	YV
Date	23/05/23
Température (°C)	23,6
Humidité (%)	42,2
Etat	7 jours
Type	Sens de la pose

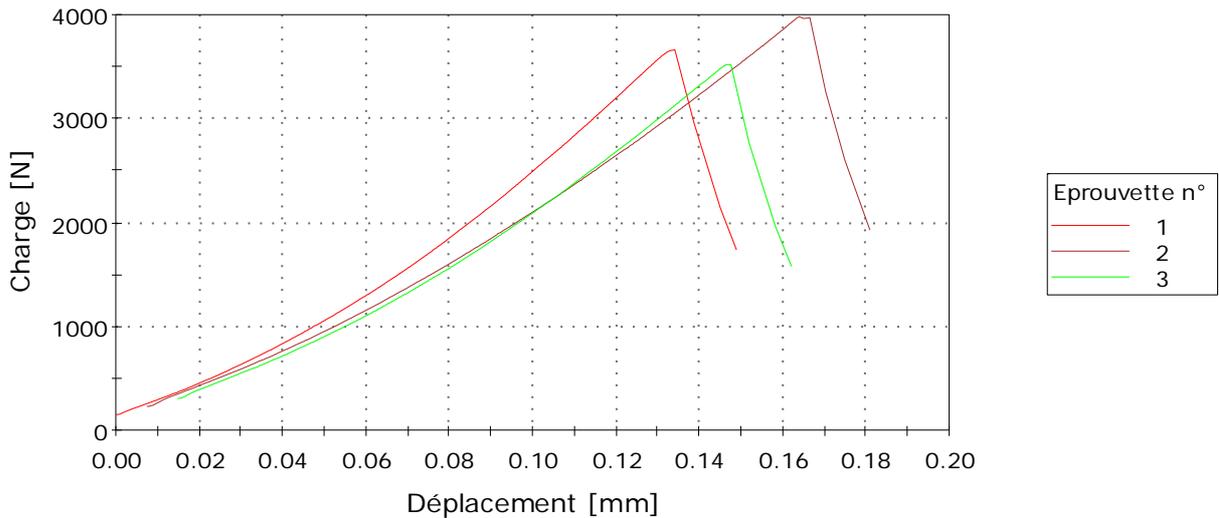
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	115382	72,11
	2	40,00	40,00	40,00	109299	68,31
	3	40,00	40,00	40,00	104703	65,44
	4	40,00	40,00	40,00	112933	70,58
	5	40,00	39,97	40,00	121787	76,17
	6	40,00	40,00	40,00	117222	73,26
Moy.		40,00	40,00	40,00	113554	70,98
E-T		0,00	0,01	0,00	6023,52	3,78

Rapport n°	Yeakleang
Date	23/05/23
Opérateur	YV
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	23,6
Humidité relative (%)	41,5
Type	sens de la pose
Etat	7 jours

Eprouvette 1 à 3

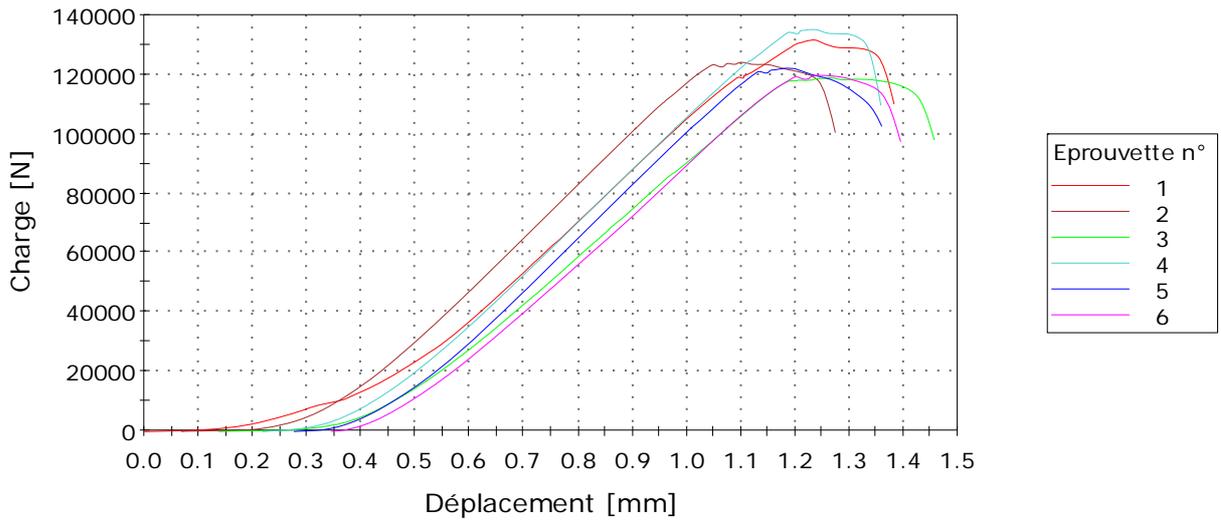


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	160,0	40,3	40,2	545,90	3663,5	8,45
	2	160,0	40,4	40,3	549,78	3980,3	9,08
	3	160,0	40,0	40,0	538,30	3521,0	8,26
Moyenne		160,0	40,2	40,2	544,66	3721,6	8,60
Ecart-type		0,0	0,2	0,2	5,8	235,1	0,4

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	8,48	2108
2	9,10	2108
3	8,26	2104
Moyenne	8,61	2107
Ecart-type	0,4	2,0

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	ADA
Date	13/06/23
Température (°C)	24,3
Humidité (%)	41,4
Etat	28 jours
Type	CA tvPL 28j

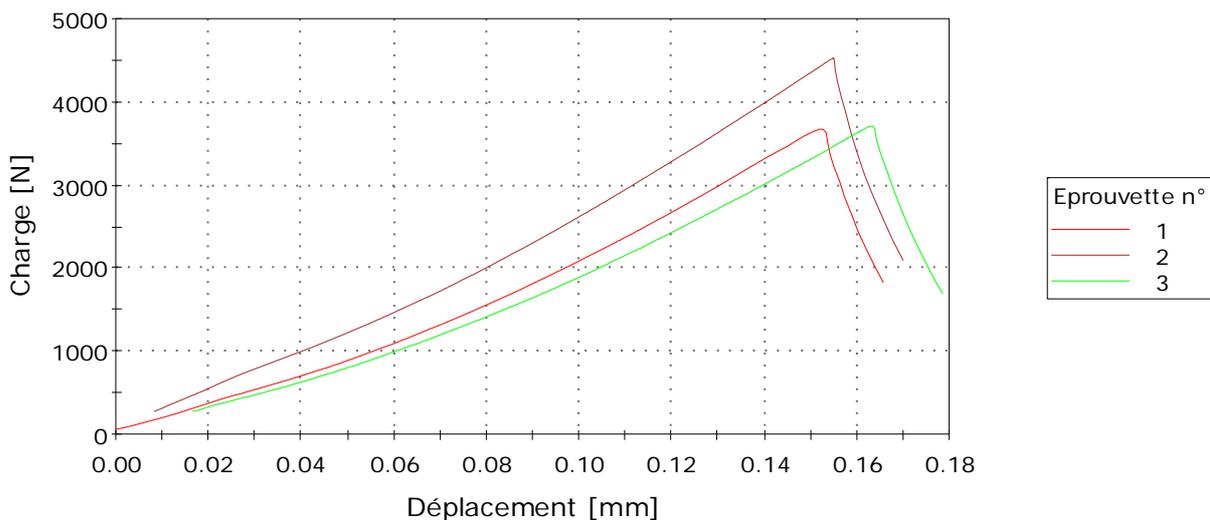
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	131537	82,21
	2	40,00	40,00	40,00	123939	77,46
	3	40,00	40,00	40,00	118781	74,24
	4	40,00	40,00	40,00	134986	84,37
	5	40,00	40,00	40,00	122004	76,25
	6	40,00	40,00	40,00	119539	74,71
	Moy.	40,00	40,00	40,00	125131	78,21
	E-T	0,00	0,00	0,00	6647,38	4,15

Rapport n°	Yeakleang
Date	13/06/23
Opérateur	ADA
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	24,3
Humidité relative (%)	42,7
Type	CA-tvPL-28j sens de pose
Etat	28 jours

Eprouvette 1 à 3

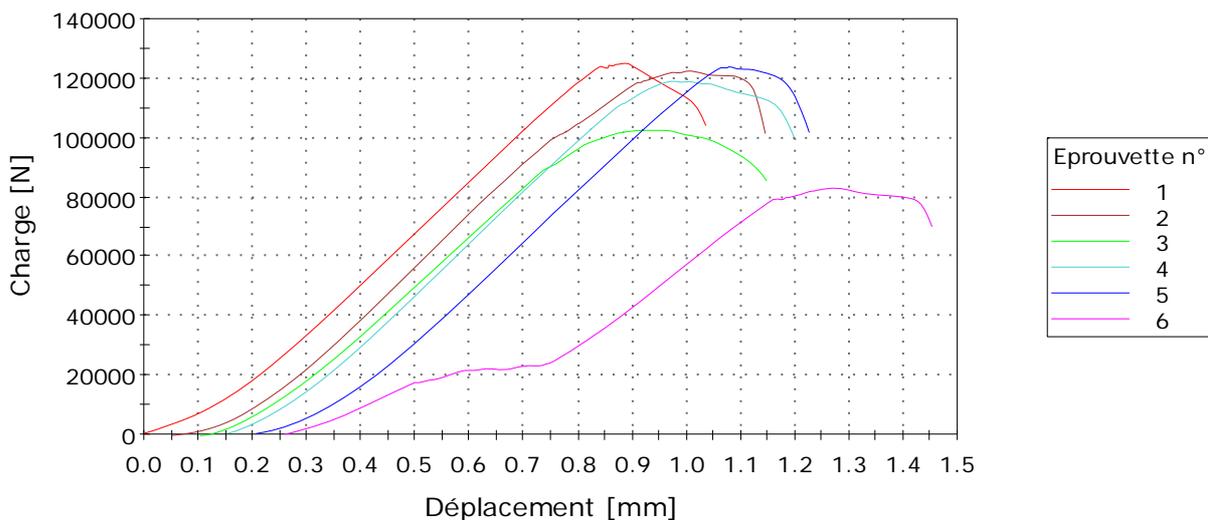


	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
	1	160,0	40,4	40,0	551,52	3673,4	8,53
	2	160,0	40,5	40,1	555,10	4530,9	10,43
	3	160,0	40,3	40,2	553,30	3711,2	8,56
Moyenne		160,0	40,4	40,1	553,31	3971,9	9,17
Ecart-type		0,0	0,1	0,1	1,8	484,6	1,1

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	8,60	2135
2	10,52	2136
3	8,59	2136
Moyenne	9,23	2135
Ecart-type	1,1	0,8

N° Rapport	Yeakleang
Nom de l'essai	Résistance en compression
Norme	EN 196-1
Vitesse	144,0 kN/min
Opérateur	ADA
Date	11/07/23
Température (°C)	24,3
Humidité (%)	47,9
Etat	56 jours
Type	CA-tvPL

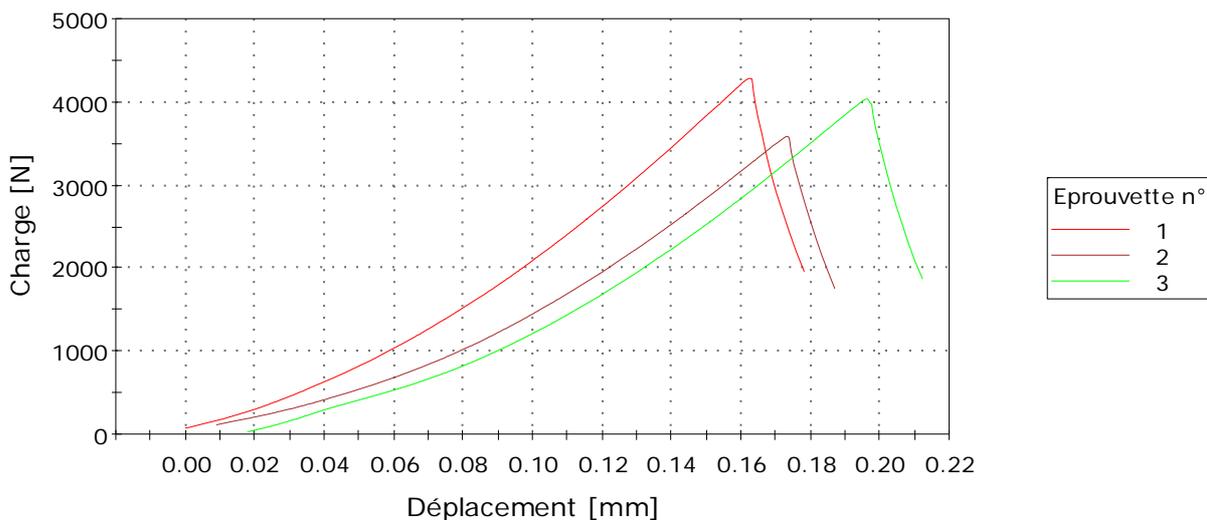
Eprouvette 1 à 6



	N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Charge max [N]	Contrainte Charge max [MPa]
	1	40,00	40,00	40,00	124955	78,10
	2	40,00	40,00	40,00	122331	76,46
	3	40,00	40,00	40,00	102504	64,06
	4	40,00	40,00	40,00	118994	74,37
	5	40,00	40,00	40,00	123784	77,37
	6	40,00	40,00	40,00	83088	51,93
	Moy.	40,00	40,00	40,00	112609	70,38
	E-T	0,00	0,00	0,00	16650,46	10,41

Rapport n°	Yeakleang
Date	11/07/23
Opérateur	ADA
Norme	EN 196-1
Vitesse:	3000, N/min
Longueur	160,0 mm
Température (°C)	24,3
Humidité relative (%)	47,9
Type	CA-tvPL
Etat	56 jours

Eprouvette 1 à 3



N°	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse [g]	Maximum Charge [N]	Contrainte Max [N/mm ²]
1	160,0	40,3	40,0	552,11	4282,3	9,96
2	160,0	40,0	39,7	532,40	3589,3	8,54
3	160,0	40,4	40,1	547,28	4039,8	9,33
Moyenne	160,0	40,2	39,9	543,93	3970,4	9,27
Ecart-type	0,0	0,2	0,2	10,3	351,7	0,7

	Contrainte flexion EN 196 [N/mm ²]	Masse Volumique [kg/m ³]
1	10,04	2140
2	8,60	2095
3	9,40	2111
Moyenne	9,35	2115
Ecart-type	0,7	22,4

A.9 Résultats des essais de gel-dégel

A.9.1 Échantillons moulés, sable naturel

*All masses are taken after 105°C heating, masses in g 13.04.2023 14.04.2023 31 cycles

Saint Bonnet sample																	
Testing Date →	20.03.2023	21.03.2023	27.03.2023	28.03.2023	10.04.2023	11.04.2023	13.04.2023	27.04.2023	08.05.2023	09.05.2023	22.05.2023	23.05.2023	12.06.2023	13.06.2023	26.06.2023	27.06.2023	
N°	Sample	Mf_7d	M_7d	Mf_14d	M_14d	Mf_28d	M_28d	Frigo cassé	Frigo réparé	Mf_56d	M_56d	Mf_56d_new	M_56d_new	Mf_91d	M_91d	Mf_91d_new	M_91d_new
1	B8A	3,75	3,75	3,69	3,69	3,85	3,85	/	/	3,78	3,82	3,66	3,68	3,8	3,8	3,68	3,69
2	B8B	3,73	3,74	3,83	3,83	3,68	3,69	/	/	3,73	3,77	3,6	3,61	3,82	3,82	3,64	3,68
3	B9A	3,65	3,66	3,83	3,83	3,67	3,67	/	/	3,81	3,82	3,75	3,75	3,65	3,65	3,61	3,61
4	B9B	3,52	3,53	3,72	3,72	3,69	3,72	/	/	3,9	3,9	3,64	3,65	3,67	3,67	3,55	3,55
5	B10A	3,9	3,97	3,66	3,69	3,66	3,69	/	/	3,74	3,75	3,74	3,78	3,65	3,65	3,69	3,74
6	B10B	3,67	3,71	3,93	3,97	3,61	3,65	/	/	3,78	3,79	3,76	3,82	3,66	3,66	3,67	3,67
7	B11A	3,88	3,94	3,81	3,86	3,82	3,85	/	/	3,75	3,77	3,82	3,83	3,7	3,73	3,56	3,56
8	B11B	3,69	3,74	3,8	3,88	3,78	3,83	/	/	3,78	3,8	3,72	3,74	3,78	3,78	3,53	3,55
9	B12A	3,62	3,62	3,71	3,71	3,6	3,6	/	/	3,81	3,83	3,79	3,8	3,83	3,86	3,56	3,56
10	B12B	3,69	3,69	3,83	3,83	3,75	3,75	/	/	3,66	3,67	3,67	3,67	3,71	3,71	3,52	3,53
11	B13A	3,69	3,69	3,82	3,82	3,66	3,69	/	/	3,81	3,92	3,74	3,75	3,55	3,55	3,6	3,6
12	B13B	3,74	3,74	3,65	3,65	3,55	3,56	/	/	3,69	3,74	3,79	3,79	3,68	3,68	3,56	3,56

Saint Bonnet sample								
Masses cumulées particules écaillées [g]								
N°	Sample	7 cycles	14 cycles	31 cycles	56 jours	56 cycles	91 jours	91 cycles
1	B8A	0	0	0	0,04	0,06	0,06	0,07
2	B8B	0,01	0,01	0,02	0,06	0,07	0,07	0,11
3	B9A	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
4	B9B	0,01	0,01	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05
5	B10A	0,07	0,1	0,13	0,14	0,18	0,18	0,23
6	B10B	0,04	0,08	0,12	0,13	0,19	0,19	0,19
7	B11A	0,06	0,11	0,14	0,16	0,17	0,2	0,2
8	B11B	0,05	0,13	0,18	0,2	0,22	0,22	0,24
9	B12A	0	0	0	0,02	0,03	0,06	0,06
10	B12B	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0,02
11	B13A	0	0	0,03	0,14	0,15	0,15	0,15
12	B13B	0	0	0,01	0,06	0,06	0,06	0,06

Saint Bonnet sample									
Géométrie									
N°	Sample	D1 [mm]	D2 [mm]	D_moyen [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H_moyen [mm]	A [mm2]	V [mm3]
1	B8A	113,08	113,09	113,09	50,03	49,95	49,99	10044	502092
2	B8B	113,05	113,07	113,06	50,48	50,62	50,55	10039	507492
3	B9A	113,13	113,14	113,14	51,45	49,95	50,70	10053	509673
4	B9B	113,18	113,35	113,27	49,92	50,33	50,13	10076	505052
5	B10A	113,09	113,14	113,12	49,94	50,23	50,09	10049	503313
6	B10B	113,12	113,23	113,18	50,79	50,56	50,68	10060	509782
7	B11A	113,11	113,07	113,09	50,04	51,56	50,80	10045	510272
8	B11B	113,25	113,50	113,38	50,34	49,91	50,13	10095	506033
9	B12A	113,08	113,14	113,11	49,24	50,40	49,82	10048	500605
10	B12B	113,23	113,78	113,51	49,74	51,18	50,46	10119	510584
11	B13A	113,10	113,13	113,12	50,98	48,91	49,95	10049	501906
12	B13B	113,35	113,78	113,57	51,53	49,96	50,75	10129	514011

Saint Bonnet sample						
S : Quantité cumulée de matériau écaillé par unité de surface [kg/m ²]						
N°	Sample	7 cycles	14 cycles	31 cycles	56 cycles	91 cycles
1	B8A	0	0	0	0,005974	0,006969
2	B8B	0,000996	0,00099608	0,001992	0,006973	0,010957
3	B9A	0,000995	0,00099476	0,000995	0,00199	0,00199
4	B9B	0,000992	0,00099247	0,00397	0,004962	0,004962
5	B10A	0,006966	0,00995107	0,012936	0,017912	0,022887
6	B10B	0,003976	0,00795242	0,011929	0,018887	0,018887
7	B11A	0,005973	0,01095102	0,013938	0,016924	0,019911
8	B11B	0,004953	0,01287712	0,01783	0,021792	0,023773
9	B12A	0	0	0	0,002986	0,005971
10	B12B	0	0	0	0,000988	0,001977
11	B13A	0	0	0,002985	0,014927	0,014927
12	B13B	0	0	0,000987	0,005923	0,005923

Saint Bonnet sample					
S : Quantité cumulée de matériau écaillé par unité de surface [kg/m ²]					
Moyennes	7 cycles	14 cycles	31 cycles	56 cycles	91 cycles
Sous eau	0,000745826	0,000745826	0,001739199	0,004974553	0,006219537
Sous solution saline	0,005466994	0,010432906	0,014158133	0,018878816	0,021364634
Sans rien	0	0	0,000993139	0,006205971	0,007199438
Ecart-types	7 cycles	14 cycles	31 cycles	56 cycles	91 cycles
Sous eau	0,000497219	0,000497219	0,001694991	0,002152599	0,003762884
Sous solution saline	0,001289637	0,002051636	0,002581575	0,002100957	0,002336087
Sans rien	0	0	0,001407299	0,006156959	0,00548101

A.9.2 Échantillons moulés, sable recyclé

*All masses are taken after 105°C heating, masses in g

38 cycles

02.05.2023 03.05.2023

Tradecowall sample																	
Testing Date →	12.03.2023	13.03.2023	20.03.2023	21.03.2023	03.04.2023	04.04.2023	13.04.2023	27.04.2023	01.05.2023	02.05.2023	15.05.2023	16.05.2023	05.06.2023	06.06.2023	19.06.2023	20.06.2023	
N°	Sample	Mf_7d	M_7d	Mf_14d	M_14d	Mf_28d	M_28d	Frigo cassé	Frigo réparé	Mf_56d	M_56d	Mf_56d_new	M_56d_new	Mf_91d	M_91d	Mf_91d_new	M_91d_new
1	T1A	3,75	3,75	3,83	3,84	3,73	3,75	/	/	3,79	3,86	3,7	3,7	3,84	3,86	3,64	3,65
2	T1B	3,93	3,93	3,82	3,85	3,64	3,68	/	/	3,53	3,8	3,66	3,69	3,54	3,62	3,69	3,71
3	T2A	4,04	4,04	3,7	3,7	3,62	3,62	/	/	3,57	3,59	3,74	3,75	3,67	3,68	3,64	3,64
4	T2B	3,77	3,77	3,9	3,9	3,67	3,69	/	/	3,66	3,68	3,68	3,72	3,63	3,63	3,69	3,69
5	T3A	3,76	3,78	3,66	3,69	3,59	3,62	/	/	3,6	3,62	3,79	3,79	3,7	3,72	3,77	3,79
6	T3B	3,91	3,95	3,81	3,85	3,74	3,85	/	/	3,61	3,72	3,68	3,72	3,7	3,73	3,67	3,73
7	T4A	3,91	3,92	3,66	3,73	3,49	3,55	/	/	3,71	3,75	3,76	3,78	3,65	3,71	3,68	3,72
8	T4B	3,87	4,24	3,72	3,99	3,81	3,92	/	/	3,54	3,56	3,72	3,73	3,74	3,76	3,81	3,89
9	T5A	3,97	3,97	3,74	3,74	3,79	3,79	/	/	3,86	3,89	3,77	3,78	3,61	3,64	3,67	3,69
10	T5B	3,88	3,88	3,72	3,73	3,81	3,81	/	/	3,69	3,71	3,62	3,63	3,63	3,64	3,59	3,61
11	T6A	3,65	3,65	3,76	3,77	3,74	3,76	/	/	3,64	3,65	3,58	3,6	3,65	3,65	3,6	3,6
12	T6B	3,93	3,93	3,7	3,7	3,81	3,81	/	/	3,62	3,64	3,57	3,58	3,59	3,59	3,6	3,6

Tradecowall sample								
Masses cumulées particules écaillées [g]								
N°	Sample	7 cycles	14 cycles	28cycles	57 jours	56 cycles	91 jours	91 cycles
1	T1A	0	0,01	0,03	0,1	0,1	0,12	0,13
2	T1B	0	0,03	0,07	0,34	0,37	0,45	0,47
3	T2A	0	0	0	0,02	0,03	0,04	0,04
4	T2B	0	0	0,02	0,04	0,08	0,08	0,08
5	T3A	0,02	0,05	0,08	0,1	0,1	0,12	0,14
6	T3B	0,04	0,08	0,19	0,3	0,34	0,37	0,43
7	T4A	0,01	0,08	0,14	0,18	0,2	0,26	0,3
8	T4B	0,37	0,64	0,75	0,77	0,78	0,8	0,88
9	T5A	0	0	0	0,03	0,04	0,07	0,09
10	T5B	0	0,01	0,01	0,03	0,04	0,05	0,07
11	T6A	0	0,01	0,03	0,04	0,06	0,06	0,06
12	T6B	0	0	0	0,02	0,03	0,03	0,03

Tradecowall sample										
Géométrie										
N°	Sample	D1 [mm]	D2 [mm]	D_moyen [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H_moyen [mm]	A [mm ²]	V [mm ³]	
1	T1A			113,2				50	10064	503214
2	T1B			113,2				50	10064	503214
3	T2A			113,2				50	10064	503214
4	T2B			113,2				50	10064	503214
5	T3A			113,2				50	10064	503214
6	T3B			113,2				50	10064	503214
7	T4A			113,2				50	10064	503214
8	T4B			113,2				50	10064	503214
9	T5A			113,2				50	10064	503214
10	T5B			113,2				50	10064	503214
11	T6A			113,2				50	10064	503214
12	T6B			113,2				50	10064	503214

Tradecowall sample						
S : Quantité cumulée de matériau écaillé par unité de surface [kg/m ²]						
N°	Sample	7 cycles	14 cycles	28 cycles	56 cycles	91 cycles
1	T1A	0	0,00099361	0,002981	0,009936	0,012917
2	T1B	0	0,00298084	0,006955	0,036764	0,0467
3	T2A	0	0	0	0,002981	0,003974
4	T2B	0	0	0,001987	0,007949	0,007949
5	T3A	0,001987	0,00496806	0,007949	0,009936	0,013911
6	T3B	0,003974	0,0079489	0,018879	0,033783	0,042725
7	T4A	0,000994	0,0079489	0,013911	0,019872	0,029808
8	T4B	0,036764	0,06359123	0,074521	0,077502	0,087438
9	T5A	0	0	0	0,003974	0,008943
10	T5B	0	0,00099361	0,000994	0,003974	0,006955
11	T6A	0	0,00099361	0,002981	0,005962	0,005962
12	T6B	0	0	0	0,002981	0,002981

Tradecowall sample					
S : Quantité cumulée de matériau écaillé par unité de surface [kg/m ²]					
Moyennes	7 cycles	14 cycles	28 cycles	56 cycles	91 cycles
Sous eau	0	0,000993613	0,002980839	0,014407388	0,017885034
Sous solution saline	0,010929743	0,021114276	0,028814777	0,035273261	0,043470569
Sans rien	0	0,000496806	0,000993613	0,004222855	0,006210081
Ecart-types	7 cycles	14 cycles	28 cycles	56 cycles	91 cycles
Sous eau	0	0,001405181	0,002925117	0,015188527	0,019555085
Sous solution saline	0,017267153	0,028352813	0,030796661	0,029802869	0,031591842
Sans rien	0	0,000573663	0,001405181	0,001250269	0,002484032

A.9.3 Échantillons imprimés, sable recyclé

*All masses are taken after 105°C heating, masses in g 24 cycles

30.05.2023 31.05.2023

Printing sample (Douai)																	
Testing Date →	27.03.2023	28.03.2023	03.04.2023	04.04.2023	13.04.2023	17.04.2023	18.04.2023	27.04.2023	15.05.2023	16.05.2023	29.05.2023	30.05.2023	19.06.2023	20.06.2023	03.07.2023	04.07.2023	
N°	Sample	Mf_7d	M_7d	Mf_14d	M_14d	Frigo cassé	Mf_28d	M_28d	Frigo réparé	Mf_56d	M_56d	Mf_56d_new	M_56d_new	Mf_91d	M_91d	Mf_91d_new	M_91d_new
1	P1	3,83	3,85	3,85	3,85	/	3,64	3,68	/	3,77	3,79	3,8	3,83			3,7	3,76
2	P2	3,69	3,71	3,66	3,66	/	3,69	3,69	/	3,58	3,59	3,72	3,73			3,75	3,79
3	P3	3,63	3,63	3,59	3,59	/	3,7	3,72	/	3,7	3,7	3,69	3,71			3,83	3,86
4	P4	3,62	3,62	3,75	3,75	/	3,63	3,65	/	3,81	3,82	3,69	3,7			3,62	3,65
5	P5	3,74	3,84	3,43	3,5	/	3,68	3,74	/	3,56	3,59	3,67	3,76			3,47	3,58
6	P6	3,67	3,7	3,57	3,59	/	3,68	3,7	/	3,65	3,66	3,76	3,76			3,51	3,54
7	P7	3,74	3,76	3,59	3,62	/	3,63	3,67	/	3,65	3,66	3,64	3,68			3,57	3,61
8	P8	3,82	3,87	3,71	3,75	/	3,64	3,65	/	3,65	3,66	3,69	3,71			3,64	3,67
9	P9	3,63	3,63	3,56	3,56	/	3,75	3,75	/	3,69	3,69	3,77	3,77			3,59	3,6
10	P10	3,69	3,69	3,75	3,75	/	3,71	3,71	/	3,76	3,76	3,87	3,87			3,68	3,71
11	P11	3,71	3,74	3,6	3,61	/	3,56	3,57	/	3,87	3,87	3,8	3,8			3,79	3,8
12	P12	3,67	3,68	3,78	3,78	/	3,54	3,54	/	3,63	3,63	3,65	3,65			3,61	3,61

Printing sample (Douai)									
Masses cumulées particules écaillées [g]									
N°	Sample	7 cycles	14 cycles	24 cycles	56 jours	56 cycles	91 jours	91 cycles	
1	P1	0,02	0,02	0,06	0,08	0,11	0,11	0,17	
2	P2	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,08	
3	P3	0	0	0,02	0,02	0,04	0,04	0,07	
4	P4	0	0	0,02	0,03	0,04	0,04	0,07	
5	P5	0,1	0,17	0,23	0,26	0,35	0,35	0,46	
6	P6	0,03	0,05	0,07	0,08	0,08	0,08	0,11	
7	P7	0,02	0,05	0,09	0,1	0,14	0,14	0,18	
8	P8	0,05	0,09	0,1	0,11	0,13	0,13	0,16	
9	P9	0	0	0	0	0	0	0,01	
10	P10	0	0	0	0	0	0	0,03	
11	P11	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	
12	P12	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	

Printing sample (Douai)										
Géométrie										
N°	Sample	D1 [mm]	D2 [mm]	D_moyen [mm]	H1 [mm]	H2 [mm]	H_moyen [mm]	A [mm ²]	V [mm ³]	
1	P1	113,18	113,14	113,16	49,52	50,70	50,11	10057	503965	
2	P2	113,15	113,18	113,17	49,45	50,49	49,97	10058	502601	
3	P3	113,15	113,15	113,15	49,56	50,08	49,82	10055	500960	
4	P4	113,15	113,24	113,20	49,47	49,88	49,68	10063	499899	
5	P5	113,12	113,24	113,18	49,96	49,53	49,75	10061	500471	
6	P6	113,14	113,17	113,16	50,11	51,18	50,65	10056	509300	
7	P7	113,17	113,18	113,18	49,48	49,82	49,65	10060	499471	
8	P8	113,27	113,16	113,22	49,83	45,43	47,63	10067	479489	
9	P9	113,16	113,49	113,33	50,31	49,71	50,01	10087	504427	
10	P10	113,16	113,18	113,17	50,21	49,78	50,00	10059	502897	
11	P11	113,16	113,28	113,22	49,52	50,79	50,16	10068	504952	
12	P12	113,15	113,16	113,16	50,40	51,08	50,74	10056	510256	

Printing sample (Douai)						
S : Quantité cumulée de matériau écaillé par unité de surface [kg/m ²]						
N°	Sample	7 cycles	14 cycles	24 cycles	56 cycles	91 cycles
1	P1	0,001989	0,00198863	0,005966	0,010937	0,016903
2	P2	0,001988	0,00198846	0,001988	0,003977	0,007954
3	P3	0	0	0,001989	0,003978	0,006961
4	P4	0	0	0,001987	0,003975	0,006956
5	P5	0,00994	0,01689739	0,022861	0,034789	0,045722
6	P6	0,002983	0,00497202	0,006961	0,007955	0,010938
7	P7	0,001988	0,00497026	0,008946	0,013917	0,017893
8	P8	0,004967	0,00894015	0,009933	0,012914	0,015894
9	P9	0	0	0	0	0,000991
10	P10	0	0	0	0	0,002982
11	P11	0,00298	0,00397305	0,004966	0,004966	0,00596
12	P12	0,000994	0,0009944	0,000994	0,000994	0,000994

Printing sample (Douai)					
S : Quantité cumulée de matériau écaillé par unité de surface [kg/m ²]					
Moyennes	7 cycles	14 cycles	24 cycles	56 cycles	91 cycles
Sous eau	0,000994272	0,000994272	0,002982683	0,005716788	0,009693633
Sous solution saline	0,004969426	0,008944954	0,012175492	0,017393562	0,022611831
Sans rien	0,000993547	0,001241863	0,001490178	0,001490178	0,002731954
Ecart-types	7 cycles	14 cycles	24 cycles	56 cycles	91 cycles
Sous eau	0,001148086	0,001148086	0,001988807	0,003480456	0,004829327
Sous solution saline	0,003537249	0,00562209	0,007230255	0,011886036	0,015681911
Sans rien	0,001404685	0,001880164	0,002364357	0,002364357	0,002347253