

Influence des sables de fonderie sur les propriétés des mortiers à l'état frais et à l'état durci

Paola Paul*¹, Komla Apedo², Essia Belhaj¹, Cécile Diliberto³, Françoise Feugeas¹

¹ICube UMR/CNRS 7357, INSA de Strasbourg ; 24 Boulevard de la Victoire, 67084 Strasbourg Cedex, France ; paola.paul@insa-strasbourg.fr

²ICube, UMR/CNRS 7357, Université de Strasbourg ; 72 Route du Rhin, F-67400, Illkirch, France

³Institut Jean Lamour, UMR/CNRS 7198, Université de Lorraine, IUTNB, CS 90137, 54600 Villers-les-Nancy, France

RÉSUMÉ. Le travail de recherche présenté ici a pour objectif d'étudier la possibilité de recycler un sable de fonderie dans le béton. Certaines des propriétés physico-chimiques du sable de fonderie et d'un mélange de sables contenant 30% de sable de fonderie ont été déterminées puis comparées à celles d'un sable normalisé ainsi qu'aux exigences de la norme des granulats pour béton. L'influence sur le mortier d'une substitution de 30 % de sable normalisé par du sable de fonderie a été étudiée pour des propriétés à l'état frais (consistance, affaissement, prise) et à l'état durci (résistance en compression, module d'Young). Les résultats obtenus montrent qu'un mélange de sables contenant 30% de sable de fonderie présente des caractéristiques similaires à un sable normalisé. Comparé à un mortier normalisé, le mortier formulé avec ce mélange de sables voit ses propriétés changer notamment du point de vue de la prise et du comportement mécanique.

ABSTRACT. The research work presented here aims to investigate the possibility of recycling foundry sand into concrete. Some of the physico-chemical properties of foundry sand and a mixed sand with 30% foundry sand were determined and compared to those of standard sand and the requirements of the aggregates for concrete standard. Subsequently, the influence of a 30% substitution of standard sand by foundry sand on the mortar was studied for some properties in the fresh state (consistency, slump, setting) and in the hardened state (compressive strength, Young's modulus). The results obtained to date show that a sand mixture containing 30% foundry sand has similar characteristics to standard sand. Compared with a standard mortar, the mortar formulated with this sand mixture has some properties that changed, particularly in terms of setting and mechanical behaviour.

MOTS-CLÉS : Valorisation, Sable de fonderie, Béton, Corrélation d'Images Numériques

KEY WORDS: Waste recycling, Foundry sand, Concrete, Digital Image Correlation.

1. Introduction

Le béton, matériau de construction le plus utilisé au monde, est un mélange granulaire dont la production massive résulte en une importante consommation de sables et de gravillons. En 2012, cette consommation a été estimée entre 25,9 et 29,6 milliards de tonnes par an [PED 14] dont 35 % en moyenne sont des sables provenant majoritairement des littoraux et des carrières. Ces ressources naturelles commencent à tarir et il devient urgent de remplacer une partie du sable naturel utilisé en construction par d'autres matériaux.

Parallèlement, l'industrie de la fonderie utilise un mélange de sable siliceux et de liant pour la fabrication de moules à usage unique nécessaires à la mise en forme de pièces métalliques. Dans ces moules, des métaux en fusion de différents types sont coulés à des températures pouvant atteindre les 1000°C. Une fois le métal refroidi, les pièces démoulées et les moules détruits, le sable brûlé est ensuite traité pour être recyclé en fonderie ou mis en décharge pour les plus usés. A l'échelle mondiale, la quantité de ces sables usés disponibles pour une valorisation dans d'autres secteurs industriels a été estimée à environ 100 millions de tonnes par an [CAR 12].

Dans ce contexte, l'objectif de ces travaux est d'étudier la faisabilité de l'incorporation d'un sable de fonderie usé (SF) dans le béton afin de proposer un matériau plus éco-respectueux où le sable de construction serait un mélange de sable naturel et de SF. La démarche retenue a été de caractériser le SF puis de confronter un mélange de sables composé de 30 % en masse de SF et de sable normalisé aux exigences de la norme des granulats pour béton (NF EN 12620+A1). Le sable mélangé (SM) a ensuite été utilisé dans la formulation d'un mortier à base de SF (MSF). Des propriétés de ce mortier à l'état frais (consistance, affaissement, prise) et à l'état durci

(résistance en compression, module d'Young) ont été comparées à celles du mortier normalisé (MN) afin d'étudier l'influence du co-produit.

2. Caractérisation physico-chimique des sables

2.1. Matériaux

Le SF résulte d'un mélange de trois types de sable de fonderie usés et traités.

Un sable normalisé (SN) certifié CEN, EN 196-1 a été utilisé comme référence.

Le sable mélangé (SM) composé de 30% de SF et 70 % de SN a été caractérisé et comparé au SN ainsi qu'aux exigences de la norme des granulats pour béton (NF EN 12620+A1).

2.2. Méthodes

La composition chimique du SF et du SN a été obtenue par Fluorescence X après détermination de la perte au feu. En complément de la composition chimique, la composition minéralogique a aussi été déterminée par Diffraction aux Rayons X (DRX) après broyage des sables et tamisage à 80 μm .

La courbe granulométrique des sables a été obtenue selon la norme NF EN 933-1. La teneur en fines a été déterminée selon la même norme par lavage au tamis à 63 μm .

Les masses volumiques des sables ont été déterminées suivant la norme NF EN 1097-6 pour des sables non lavés et non broyés. Contrairement au fuseau 0,063/4 mm spécifié, le fuseau étudié est compris entre 0 et 2 mm (0/2 mm). Il a été choisi d'une part afin de prendre en compte l'influence des fines (< 63 μm) et d'autre part parce que le diamètre des grains de sable ne dépasse pas 2 mm. Le coefficient d'absorption d'eau des sables a aussi été déterminé selon la norme NF EN 1097-6 après un trempage de 24h.

2.3. Résultats et discussions

L'analyse par Fluorescence X a permis d'observer que le SN et le SF sont majoritairement composés de silice (SiO_2) en proportion de 97 % pour le SN et de 82 % pour le SF. D'après les diffractogrammes obtenus en DRX, cette proportion de silice est sous forme de quartz qui représente la phase principale détectée. La teneur en silice diminue pour le SF car les teneurs en oxydes d'aluminium (Al_2O_3), de fer (Fe_2O_3), et de chrome (Cr_2O_3) presque nulles pour le SN sont plus importantes dans le co-produit (3,09 % ; 3,96 % et 4,67 % respectivement). Cette concentration plus importante en aluminium, en fer et en chrome peut être due aux métaux coulés. Tout comme pour le SF utilisé ici, les sables de fonderie utilisés dans la littérature sont généralement composés de silice, d'aluminium et de fer en proportions variables [ETX 10, ILO 19]. Selon le type de sable de fonderie et les métaux coulés, d'autres éléments comme le potassium (K_2O), le magnésium (MgO) ou le chrome (Cr_2O_3) peuvent se trouver à des concentrations plus élevées [ILO 19]. La perte au feu du SF est de 1,5 % et est nettement supérieure à celle du SN (0,1 %). Ce paramètre très variable pour les différents sables de fonderie étudiés dans la littérature permet d'estimer la teneur en composants organiques pouvant altérer la prise des matériaux cimentaires.

La Figure 1 présente les courbes granulométriques des trois sables : SN, SF et SM. Elle montre que SN appartient au fuseau 0/2 et que SF ne rentre pas dans le fuseau granulométrique recommandé par la norme NF EN 196-1. Avec 95 % de ces grains ayant un diamètre inférieur à 0,5 mm, il s'apparente plus à un sable 0/0,5. Ces résultats sont conformes aux observations de Siddique et Singh [SID 11] qui ont rapporté que 85 à 95 % des matériaux ont généralement un diamètre compris entre 0,15 mm et 0,60 mm. La composition du SM a été étudiée en fonction des courbes granulaires du SN et du SF avec pour objectif de respecter au mieux les exigences granulométriques de la norme NF EN 196-1. En conséquence, il est composé de 30 % de SF 0/0,5 et de 70 % de SN 0,5/2.

Le Tableau 1 regroupe les résultats de caractérisation physique des trois sables testés dans le fuseau 0/2. Nous pouvons constater que la teneur en fines est nulle pour le SN et beaucoup plus élevée pour le SF (3,1 %). Pour le SM cette valeur est aussi élevée mais ne dépasse pas les 3 % qui représentent le seuil de nocivité des fines défini par la norme NF EN 12620+A1. SF a une masse volumique plus importante que SN. Ceci pourrait être dû à certaines particules métalliques présentes dans SF suite à la coulée des métaux. La masse volumique du SM n'est pas une valeur intermédiaire des deux premières et est équivalente à celle du SN. Le coefficient d'absorption

d'eau de SN est presque nul (0,09 %). Celui de SF un peu plus élevé (0,39 %) fait augmenter la valeur de cette caractéristique physique pour le SM (0,28 %).

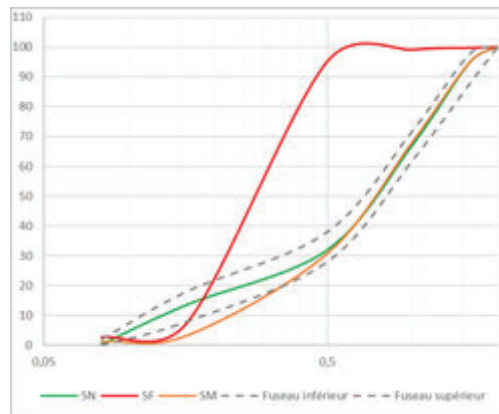


Figure 1. Courbes granulométriques des sables

Tableau 1. Propriétés physiques des sables

	SN	SF	SM
Teneur en fines (%)	0,0 ± 0,0	3,1 ± 0,6	2,0 ± 0,9
Masse volumique absolue (t/m ³)	2,64 ± 0,00	2,72 ± 0,01	2,64 ± 0,00
Coefficient d'absorption d'eau (%)	0,09 ± 0,06	0,39 ± 0,07	0,28 ± 0,07

3. Effet de l'ajout de sable de fonderie dans le mortier

3.1. Matériaux

Le ciment utilisé pour la fabrication des mortiers est un CEM I 52,5 N contenant 97 % de clinker.

Les deux mortiers (MN et MSF) ont été formulés à consistance normalisée selon la norme NF EN 196-1.

3.2. Méthodes

La consistance des mortiers a été déterminée selon la norme NF EN 413-2. En plus de l'essai de consistance, les mortiers ont été caractérisés à l'état frais suivant les essais d'affaissement et de prise. L'essai d'affaissement a été inspiré de la norme NF EN 12 350-2 relative au béton et réadaptée pour le mortier avec un cône à dimensions réduites. L'essai de début de prise a été réalisé sur un appareil multiposte automatique piloté par le logiciel Prisolab ®.

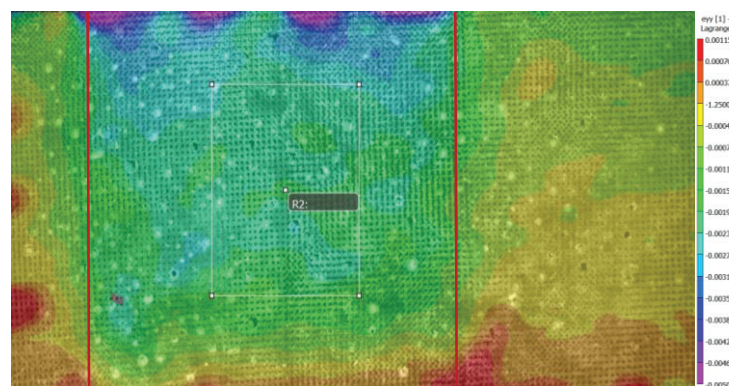


Figure 2. Détermination de la zone de calcul du module d'Young (R2) par CIN

Les résistances en compression des mortiers ont été déterminées à 7, 14, 21, 28, 56 et 90 jours suivant la norme NF EN 196-1. A 28 jours, ces essais ont été couplés à de la Corrélation d'Images Numériques (CIN). La

CIN permet de suivre le champ cinématique sur toute la surface d'une éprouvette durant sa sollicitation. Au cours de la corrélation d'images, une image de l'éprouvette déformée dans une configuration chargée est comparée à une image de référence qui correspond à une image de l'éprouvette non déformée prise dans sa configuration non chargée. Il en résulte la mesure d'un champ de déplacements et par dérivation numérique, un champ de déformations [APE 16]. L'objectif est de déterminer le module d'Young des mortiers et d'étudier leur processus de fissuration sous compression. Le module d'Young est calculé à partir de la courbe contrainte-déformation obtenue pour une zone située au centre de la surface (Figure 2 : zone R2 en blanc ; les traits rouges représentent les limites du bâti de compression). Une approximation linéaire de cette courbe est réalisée entre 0 et 40 % de la contrainte maximale. Le module d'Young est considéré comme le coefficient directeur de cette droite.

3.3. Résultats et discussions

Pour travailler à consistance normalisée (35 ± 3 mm) avec une masse de 450 g de ciment et 1350 g de sables secs, la quantité d'eau ajoutée était de 225 g pour le MN et 216 g pour le MSF. Malgré un coefficient d'absorption d'eau plus élevé pour le mélange de sables, nous constatons que la quantité d'eau nécessaire pour travailler à consistance normalisée diminue pour MSF. Ceci peut être dû à la granulométrie différente du SM. Les deux mortiers présentent le même affaissement (34 mm) et l'ajout de SF dans la formulation du mortier entraîne un retard d'une heure sur le début de prise. Ce retard de prise peut être dû aux composés organiques présents dans le SF et mis en évidence par une perte au feu de 1,5%.

L'étude de l'évolution de la résistance en compression des mortiers montre une augmentation de la résistance entre 7 et 90 jours plus importante pour MN (25 % de 50,0 à 62,6 MPa) que pour MSF (17 % de 42,5 à 49,6 MPa). Pour le MN, elle a lieu essentiellement entre 7 et 14 jours alors qu'elle est plus continue pour le MSF. Entre 7 et 90 jours, l'ajout de SF dans le mortier entraîne une perte de résistance de 15 à 19 %. A 28 jours, MN et MSF atteignent une résistance en compression de 58,3 et 48,2 MPa respectivement. L'ajout de 30 % de SF ne permet donc pas d'atteindre les 52,5 MPa garantis par l'utilisation d'un CEM I 52,5 et entraîne une perte de résistance de 17 %. Le module d'Young calculé à 28 jours est de $32,8 \pm 1,0$ GPa pour MN et $23,8 \pm 0,5$ GPa pour MSF. Cette diminution de 27 % traduit une perte de rigidité due par l'ajout de 30 % de SF.

4. Conclusion

L'objectif de ces travaux était d'étudier la possibilité de recycler un SF dans le béton en substitution de 30 % de sable naturel. Les essais réalisés ont permis de constater qu'un SM composé de 30 % de SF 0/0,5 et 70 % de SN 0,5/2 présente des propriétés physiques similaires au SN et proches des recommandations de la norme des granulats pour béton (NF EN 12620+A1). Un MSF formulé à consistance normalisée présente le même affaissement qu'un MN mais un retard d'environ une heure dans le début de prise. En ce qui concerne les propriétés à l'état durci, la substitution de SN par 30 % de SF entraîne une perte de rigidité ainsi qu'une diminution de la résistance de 15 à 19 % entre 7 et 90 jours. D'autres essais sont en cours pour comprendre l'influence de SF sur la prise des matériaux cimentaires, l'évolution de leurs résistances mécaniques et leur processus de fissuration.

5. Bibliographie

- [APE 16] APEDO, K.L., BRAYMAND, S., HOERD, F., FEUGEAS, F., FOND, C., « Failure process of fine recycled concrete aggregate mortars based on Digital Image Correlation », *International Digital Imaging Correlation Society: Proceedings of the First Annual Conference*, 2016
- [CAR 12] CARNIN, R.L.P., FOLGUERAS, M.V., LUVIZÃO, R.R., CORREIA, S.L., DA CUNHA, C.J., DUNGAN, R.S., « Use of an integrated approach to characterize the physicochemical properties of foundry green sands », *Thermochimica Acta*, vol. 543, 2012, p. 150–155.
- [ETX 10] ETXEBERRIA, M., PACHECO, C., MENESES, J.M., BERRIDI, I., « Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates » *Construction and Building Materials*, vol. 24, 2010, p. 1594–1600.
- [ILO 19] ILOH, P., FANOURAKIS, G., OGRA, A., « Evaluation of Physical and Chemical Properties of South African Waste Foundry Sand (WFS) for Concrete Use » *Sustainability*, vol.11, 2019, p 193.
- [PED 14] PEDUZZI, P., « Sand, rarer than one thinks » *Environmental Development*, vol 11, 2014, p 208–218.