UNIVERSITE DE STRASBOURG

ECOLE DOCTORALE MATHEMATIQUES SCIENCES DE L'INFORMATION ET DE L'INGENIEUR

RESUME DE LA THESE DE DOCTORAT

Discipline : Génie Civil

Spécialité (facultative) : Matériaux

Présentée par : Paola PAUL

Titre :

Analyse multi-échelle de l'influence d'un sable de fonderie chimique sur les propriétés mécaniques de matériaux cimentaires

Unité de Recherche :
UMR 7357 – ICube, Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie

Directeur de Thèse : Françoise FEUGEAS, Professeur des Universités

Co-Directeur de Thèse (s'il y a lieu) :

Localisation : INSA de Strasbourg

Thèse confidentielle : ✕ NON ☐ OUI

RESUME

Le béton est un matériau de construction constitué d'un mélange de ciment, d'eau, de sable et de gravillons naturels. Sa forte production à l'échelle mondiale entraine une importante consommation de granulats : entre 25,9 et 29,6 milliards de tonnes par an [1] avec, en moyenne, 35 % de sable provenant majoritairement des littoraux et des carrières. Parallèlement, environ 100 millions de tonnes par an de sable de fonderie usé sont mises en décharge et disponibles pour une valorisation dans différents secteurs industriels [2]. Le sable de fonderie usé est un déchet provenant de la fabrication de moules à usage unique dans lesquels des métaux en fusion de différents types (acier, aluminium, fonte…) sont coulés à des températures pouvant atteindre 1000°C. Il est généralement composé d'un sable fin siliceux et d'un liant minéral (sable de fonderie à vert) ou organique (sable de fonderie chimique). Valoriser ce déchet dans le béton répondrait donc à un double enjeu écologique en libérant l'espace dédié à son stockage tout en préservant une partie des sables naturels généralement utilisés dans le béton.

La synthèse bibliographique réalisée pour une vingtaine de travaux traitant de l'effet de différents taux de substitution de ce déchet sur les propriétés mécaniques des bétons a mis en évidence des gains ou des pertes de résistance dès 10 % de substitution. Le taux de 30 % de ce même type de sable apparait comme un optimum dans le cadre de trois études [3]–[5]. Au-delà de ce taux, la tendance générale est à une diminution des résistances mécaniques. Les paramètres généralement mis en cause pour expliquer les modifications des propriétés mécaniques sont la granulométrie du déchet et sa composition chimique. En effet, la finesse ainsi que la forte teneur en fines de ce type de sable influence la demande en eau des mortiers et bétons les contenant [6]–[8]. Les impuretés organiques et d'éléments métalliques présents dans ces déchets sont également susceptibles de modifier les réactions d'hydratation [9] et/ou d'altérer les liaisons pâte-granulats [6].

L'analyse de l'influence de ces paramètres a fait l'objet de peu d'études approfondies. C'est pourquoi, l'objectif de ces travaux est d'analyser l'effet d'un sable de fonderie chimique sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires. Afin de faciliter la mise en évidence de son influence sur ces propriétés, le choix a été fait de s'affranchir de l'effet combiné des gravillons et d'étudier principalement l'effet de son incorporation dans les mortiers plutôt que dans les bétons. Le sable de fonderie a été caractérisé par des essais physico-chimiques et son effet sur les propriétés mécaniques des mortiers en flexion et en compression a été analysé. Une procédure originale a été mise au point avec le couplage de ces essais à la technique de Corrélation d'Images Numériques (CIN). L'intérêt de cette technique réside dans le suivi des champs cinématiques qui permet une étude approfondie du processus d'endommagement des mortiers et la détermination de leur module d'élasticité. L'analyse des paramètres influant sur les propriétés mécaniques a été effectuée à différentes échelles (macroscopique et microscopique). L'évolution de l'ouvrabilité, de la porosité et de la cinétique d'hydratation a été évaluée en fonction du pourcentage d'incorporation de sable de fonderie.

La caractérisation du sable de fonderie (SF) chimique a été réalisée conformément à la norme relative aux granulats pour béton [10]. Du fait des particularités du déchet, des essais complémentaires ont été réalisés afin d'étudier sa morphologie et de déterminer sa composition chimique et minéralogique. Un sable siliceux normalisé (SN) appartenant au fuseau 0/2 mm a été utilisé comme référence et caractérisé selon les mêmes essais. Les résultats ont permis de conclure en une conformité du SF pour une utilisation dans le béton au regard de la norme NF EN 12620 [10]. Ils ont aussi mis en évidence une granulométrie plus fine du SF en comparaison au SN. A partir des courbes

granulométriques obtenues pour ces deux sables, un sable mélangé (SM) à granulométrie optimisée (30% SF 0/0,5 mm + 70% SN 0,5/2 mm) a été formulé afin de se rapprocher au mieux du fuseau normalisé. La caractérisation chimique a mis en évidence la présence majoritaire de silice dans le SF et le SN. Des éléments métalliques (aluminium, fer, chrome, magnésium) sont aussi présents dans le déchet sous formes d'agglomérats de métaux et de silice ou encore de minéraux comme la chromite. La majorité des grains présents dans le SF sont enrobés de résidus de résine phénolique calcinée.

Trois mortiers ont été formulés à consistance équivalente, avec un ciment CEM I 52,5 et des taux de SF variés :

- MN : formulé avec SN (0 % de SF) et un rapport E/C de 0,50
- MSF : formulé avec SM (30 % SF) et un rapport E/C de 0,48
- MSFT : formulé avec 100 % de SF et un rapport E/C de 0,60

Les résultats des essais normalisés de résistances mécaniques réalisés entre 2 jours et 2 ans ont mis en évidence une perte de résistance de 13 à 19 % en compression et de 7 à 31 % en flexion pour MSF. Les valeurs de résistances mécaniques se stabilisent à 120 jours pour MN alors qu'une augmentation est constatée entre 120 jours et 2 ans pour MSF. Cette augmentation tardive peut traduire un retard dans le processus de durcissement du mortier contenant du sable de fonderie. L'influence de la substitution des 30% de SF sur la rigidité des mortiers a été déterminée à 28, 56 et 190 jours. Une diminution variant entre 7% à 28 jours et 18 % à 190 jours a été constatée pour le module d'élasticité de MSF. Les résultats obtenus à 28 jours pour MSFT mettent en évidence une diminution plus importante des propriétés mécaniques pour une substitution totale de SF. Une chute de 50 % est constatée dans les valeurs de résistances mécaniques et de module d'élasticité.

L'étude des champs cinématiques réalisés au cours des essais de flexion a mis en évidence un processus d'endommagement similaire pour MN et MSF. Il peut se diviser en quatre phases en observant la cinétique de l'évolution des déformations transversales en fonction du chargement :

- Phase 1 : Initiation de plusieurs microfissures (0 à 35 % de la force maximale « Fmax »)
- Phase 2 : Propagation des microfissures (35 à 70 % de Fmax)
- Phase 3 : Formation des macro-fissures (70 à 90 % de Fmax)
- Phase 4 : Formation et propagation de la fissure principale responsable de la rupture (90 à 100 % de Fmax)

L'utilisation de 30% de sable de fonderie affecte peu les valeurs de déformations mesurées aux limites des différentes phases. Cependant, si l'on observe l'évolution des déformations directement en fonction de la charge, les déformations de MSF deviennent plus importantes à partir de 1300-1700 N et la rupture du matériau survient plus rapidement que pour MN. Les résultats obtenus à 28 jours pour MSFT ont mis en évidence que la substitution totale du sable entraine une forte augmentation des déformations dès la phase 1 ainsi qu'une apparition anticipée de la fissure principale. Les caractéristiques géométriques (longueur, tortuosité et ouverture) de cette fissure ont été déterminées sous charge maximale. Les résultats sont similaires pour les trois mortiers à l'exception de la forte augmentation de l'ouverture maximale constatée pour MSFT.

L'analyse des paramètres influant sur les propriétés mécaniques a montré que la granulométrie plus fine du sable de fonderie peut entrainer une demande en eau plus importante et une perte de résistances mécaniques des mortiers. Cela ne permet cependant pas d'expliquer les pertes de résistances mécaniques observées malgré une optimisation de la granularité des mélanges de sables, notamment dans le cas de MSF.

La présence d'éléments métalliques et de résidus de résine a induit un retard d'hydratation durant la prise de MSF. Ce retard associé au gain tardif de résistance mécanique des matériaux indique que ce phénomène observé durant la phase de durcissement apparaît dès le début de l'hydratation. Aucune modification de la porosité totale accessible à l'eau n'a été constatée pour MSF. Cependant, l'analyse de la microstructure des mortiers a mis en évidence une présence plus importante de pores de petites tailles très dispersés dans la matrice cimentaire de MSF. L'analyse par Image J a permis de quantifier la porosité observable sur les plans de coupe. Elle apparait plus importante pour les MSF que pour les MN, notamment du fait de la présence de porosités fermées. Cette différence dans la géométrie et la répartition des pores peut contribuer aux pertes de résistances. Pour MSFT, la porosité totale accessible à l'eau augmente pour atteindre des valeurs de l'ordre de 20 % contre 15 % pour MN et MSF. Les observations de la microstructure de ce mortier ont aussi mis en évidence la présence d'un nombre important de microfissures qui peuvent expliquer les valeurs importantes de déformations dès les premières phases de son processus d'endommagement.

L'incorporation du sable de fonderie dans les matériaux cimentaires est une solution intéressante d'un point de vue environnemental mais les taux d'incorporation doivent rester faibles (inférieurs ou égaux à 30 %). En effet, avec le sable de fonderie chimique étudié ici, une diminution des propriétés mécaniques (jusqu'à 19 % en compression) a été observée pour MSF. Il est important de noter que le béton formulé avec 30 % de sable de fonderie présente des résistances en compression équivalentes à celles d'un béton de granulats naturels.

Ce travail a permis la mise en évidence de l'influence d'un type de sable particulier : un déchet de l'industrie métallurgique composé principalement de silice avec des résidus métalliques et phénoliques. Cette influence aux échelles macroscopique et microscopique a été étudiée notamment grâce à la technique CIN qui a permis d'analyser le processus d'endommagement des mortiers avec et sans sable de fonderie. Les résultats obtenus justifient l'intérêt de développer et d'approfondir les connaissances concernant l'influence de ce type de déchet sur le comportement à court et à long-terme des bétons, particulièrement pour de futures formulations avec des granulats de béton recyclé.

REFERENCES

[1] P. Peduzzi, « Sand, rarer than one thinks », *Environmental Development*, vol. 11, p. 208-218, juill. 2014, doi: 10.1016/j.envdev.2014.04.001.

[2] R. L. P. Carnin, M. V. Folgueras, R. R. Luvizão, S. L. Correia, C. J. da Cunha, et R. S. Dungan, « Use of an integrated approach to characterize the physicochemical properties of foundry green sands », *Thermochimica Acta*, vol. 543, p. 150-155, sept. 2012, doi: 10.1016/j.tca.2012.05.018.

[3] N. Gurumoorthy et K. Arunachalam, « Micro and mechanical behaviour of Treated Used Foundry Sand concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 123, p. 184-190, oct. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.143.

[4] R. Siddique, Y. Aggarwal, P. Aggarwal, E.-H. Kadri, et R. Bennacer, « Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS) », *Construction and*

Building Materials, vol. 25, n° 4, p. 1916-1925, avr. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.065.
[5] A. Torres, L. Bartlett, et C. Pilgrim, « Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland Cement Concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 135, p. 674-681, mars 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.028.
[6] G. J. L. Coppio, M. G. de Lima, J. W. Lencioni, L. S. Cividanes, P. P. O. L. Dyer, et S. A. Silva, « Surface electrical resistivity and compressive strength of concrete with the use of waste foundry sand as aggregate », *Construction and Building Materials*, vol. 212, p. 514-521, juill. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.297.
[7] S. Monosi, F. Tittarelli, C. Giosuè, et M. L. Ruello, « Effect of two different sources and washing treatment on the properties of UFS by-products for mortar and concrete production », *Construction and Building Materials*, vol. 44, p. 260-266, juill. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.029.
[8] G. Ganesh Prabhu, J. H. Hyun, et Y. Y. Kim, « Effects of foundry sand as a fine aggregate in concrete production », *Construction and Building Materials*, vol. 70, p. 514-521, nov. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.070.
[9] M. Şahmaran, M. Lachemi, T. K. Erdem, et H. E. Yücel, « Use of spent foundry sand and fly ash for the development of green self-consolidating concrete », *Materials and Structures*, vol. 44, n° 7, p. 1193-1204, août 2011, doi: 10.1617/s11527-010-9692-7.
[10] NF EN 12620+A1, « Granulats pour béton », juin 2008. Consulté le: janv. 10, 2019. [En ligne]. Disponible sur: https://viewer.afnor.org/Pdf/Viewer/?token=W00xAg5-Knw1

COMMUNICATION – VALORISATION DE LA RECHERCHE

Publication dans revue internationale avec comité de lecture

- « Comprehensive physical and chemical characterization of spent foundry sand for recycling in concrete », article en cours de rédaction

Communications nationales avec comité de lecture

- P. Paul, E. Belhaj, K. Apedo, F. Feugeas, « Analyse multi-échelle des propriétés mécaniques des bétons à base de sable de fonderie », XIVe Forum Jeunes Chercheurs (Commission Biodétérioration des matériaux du CEFRACOR), Nancy, France, Université de Nancy, CEFRACOR, 2017
- P. Paul, E. Belhaj, K. Apedo, F. Feugeas, « Analyse multi-échelle de l'influence des sables de fonderie sur les propriétés des mortiers à l'état frais et à l'état durci », Matériaux 2018, Strasbourg, France, 2018
- P. Paul, K. Apedo, E. Belhaj, C. Diliberton, F. Feugeas, « Influence des sables de fonderie sur les propriétés des mortiers à l'état frais et à l'état durci », 37e Rencontres Universitaires du Génie Civil, Sophia-Antipolis, France, 2019

Communications orales : poster

- VIIIe Journée du Département Mécanique d'ICube, Strasbourg, 2019. Distinction : 1er Prix
- Journée Recherche INSA de Strasbourg, Strasbourg, 2019
- XIVe Forum Jeunes Chercheurs, (Commission Biodétérioration des matériaux du CEFRACOR), Nancy, 2018
- Journée Poster de l'Ecole Doctorale MSII, Strasbourg, 2018