
Etude de l'influence des granulats recyclés sur le comportement des MBE

Z. Tahar*, E. Kadri, T. T. Ngo, A. Bouvet, A. Kaci, S. Aggoun

Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC), Université de Cergy-pontoise, 5, mail Gay-Lussac, Neuville-sur-Oise, 95031 Cergy-Pontoise

*Correspondance : zine-el-abidine.tahar@etu.u-cergy.fr

RÉSUMÉ. L'élargissement de l'utilisation des matériaux cimentaires comportant des granulats recyclés, dont les propriétés physico-chimiques sont différentes de ceux à base de granulats naturels, est inévitablement cautionné par une maîtrise accrue, d'une part, de leurs propriétés mécaniques, d'autre part, de leur mise en œuvre. Afin d'optimiser ces derniers, l'étude menée porte principalement sur l'impact de la nature et du dosage en granulats recyclés sur la mise en œuvre et sur la résistance mécanique de MBE (Mortier de Béton Equivalent).

Les propriétés à l'état frais et durci des MBE fabriqués avec différents pourcentages de substitution de sable recyclé et différents couples ciment/adjuvant ont été comparées à celles des MBE de référence. Les résultats montrent que le maintien de la maniabilité du béton recyclé dépend du couple ciment/adjuvant ainsi que du dosage de substitution en granulats recyclés.

ABSTRACT. Expanding the use of cementitious materials containing recycled aggregates whose physicochemical properties are different from those based on natural aggregates, is inevitably backed by the increased mastery of their mechanical properties and their implementation. To optimize the latter, the study focuses on the impact of nature and of the dosage of recycled aggregates upon the implementation and on the mechanical strength of (CEM) concrete equivalent mortar.

The properties of the fresh and hardened CEM that is manufactured with different percentages of substitutions of the recycled sand and with different torques cement / additive were compared with those of the reference CEM.

The results show that the maintenance of the maneuverability of the recycled concrete depends on the torque cement / adjuvant, it also depends on the dosage of the substitution of recycled aggregates.

MOTS-CLÉS : MBE, sable recyclé, rhéologie, maniabilité.

KEYWORDS: CEM, recycled sand, rheology, workability.

1. Introduction

Le besoin croissant de matériaux de construction engendre un épuisement des ressources. Ainsi, l'utilisation de granulats recyclés dans la fabrication des matériaux cimentaires est une voie pour répondre aux besoins tout en préservant l'environnement dans une démarche de construction durable.

Afin d'élargir l'utilisation des matériaux cimentaires confectionnés avec des granulats recyclés, comme le béton ou le mortier, il convient de maîtriser leurs propriétés mécaniques et leur mise en œuvre. Des études récentes montrent que le comportement à l'état frais d'un béton avec des granulats naturels dépend de plusieurs paramètres dont la nature de l'adjuvant, de son dosage, de la nature des granulats et de leurs dimensions [NGO 2009; Ngo et al. 2010; H. SOUALHI 2014; Wallevik and Wallevik 2011]. Pour étudier l'impact de la nature et du dosage des granulats recyclés sur la mise en œuvre et sur les performances mécaniques des bétons, l'étude a été menée sur plusieurs MBE fabriqués via différents couples ciment/adjuvant avec différents pourcentages de substitution de sable recyclé.

Les propriétés à l'état frais et durci des MBE, sélectionnés à partir de deux formulations de béton, ont été comparées à celles des MBE de référence fabriqués avec du sable naturel. Les caractéristiques des matériaux utilisés dans cette étude sont détaillées dans la partie suivante.

2. Matériaux utilisés et programme expérimental

2.1. Matériaux utilisés

2.1.1. Sables

Dans ce travail de recherche, deux types de sable ont été utilisés : du sable naturel et du sable recyclé (nommés respectivement SN et SR par la suite). Les courbes granulométriques des sables utilisés sont représentées sur la Fig.1. Le SN, semi-concassés lavés 0/4 (provenant de Lafarge, Sandracourt), a un coefficient d'absorption d'eau égal à 0,9% et un module de finesse de 2,25%. Le SR, provenant de la plateforme de production DLB située à Gonesse, a un coefficient d'absorption d'eau égal à 1% et un module de finesse de 3,27%. Les modules de finesse ont été déterminés conformément à la norme [NF EN 12620+A1].

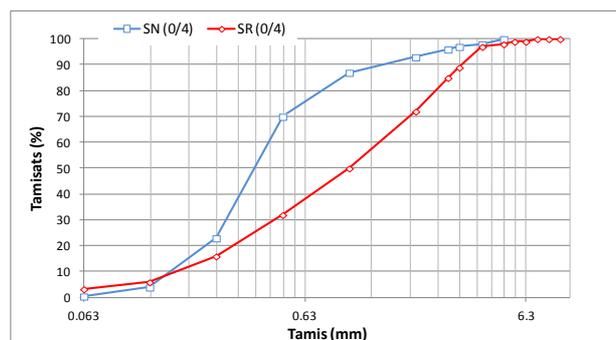


Figure 1. Courbes granulométriques des sables naturels (SN) et recyclés (SR).

2.1.2. Ciments et adjuvants

Deux couples ciment/adjuvant ont été sélectionnés. Leurs caractéristiques sont représentées dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 1. Constituants et caractéristiques minéralogiques des deux ciments utilisés.

Ciments		Constituants et caractéristiques (%)			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
C1	CEM I 52,5R CE CP2	52,1	21,0	9,2	10,3
C2	CEM I 52,5R CE	57,6	18,3	8,2	9,8

Tableau 2. Caractéristiques physiques et chimiques des deux ciments utilisés.

Ciments	Caractéristiques physiques					Caractéristiques chimiques			
	Finesse Blaine (cm ² /g)	Diamètre médian (µm)	Demande en eau (%)	Temps de début de prise (min)	Chaleur d'hydratation à 41h (j/g)	Na ₂ O eq actifs	Perte au feu 950°C (%)	SO ₃ (%)	S ²⁻ (%)
C1	4520	9,7	27,2	120	328	0,78	0,79	3,66	0,00
C2	3250	16,5	26,0	165	300	0,60	2,08	3,32	0,01

Les adjuvants choisis sont des super-plastifiants donc des adjuvants haut réducteurs d'eau et modificateurs de la rhéologie du béton dont les caractéristiques sont rassemblées dans le tableau 3

Tableau 3. Caractéristiques des adjuvants utilisés avec deux ciments choisis.

Couples ciment/adjuvant	A	B
Ciment	C1	C2
Adjuvant	Sp1	Sp2
Teneur en extrait sec	22,5 %	22,5 %
Forme	Liquide	Liquide
Couleur	jaune clair	Brun clair
PH	7	6 à 8
Dosage recommandé	0,2% à 1,9%	0,2% à 1,9%
Teneur en Na₂O Eq.	≤ 1%	≤ 1%
Teneur en ions Cl⁻	≤ 0,1%	≤ 0,1%
Nature chimique	polycarboxylate	Ether polycarboxylique

2.2. Programme expérimental

La composition des deux MBE de références testées a été obtenue à partir de deux formulations de bétons de caractéristiques différentes. Les formulations des MBE et des bétons sont consignées dans le tableau 4.

Tableau 4. Formulation des bétons et MBE de référence sélectionnée

	Paramètres	E/C	Ciment [Kg/m ³]	Sable naturel 0/4 [Kg/m ³]	Gravier 4/10 [Kg/m ³]	Gravier 10/20 [Kg/m ³]	Eau [Kg/m ³]	Adjuvant [%]
Bétons	B45	0,45	365	831	330	706	164	-
	B55	0,55	320	852	325	696	176	-
MBE*	MBE45	0,45	365	887	-	-	169,5	0,9-1,6
	MBE55	0,55	320	907	-	-	182,4	0,6-1,7

*Pour chaque MBE plusieurs pourcentages massiques de substitution du sable naturel par du recyclé ont été testés (0, 15, 30 et 100%).

Après avoir fabriqué chaque MBE, les tests suivants ont été réalisés :

+ **Essai de maniabilité** : l'étalement des MBE a été mesuré [A. Schwartzentruber 2000] en utilisant le mini-cône dont les dimensions sont données dans la figure 2.

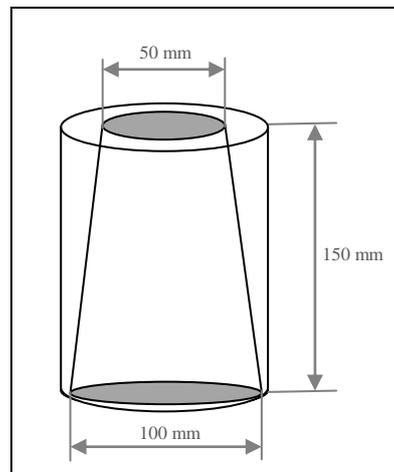


Figure 2. Dimensions du mini-cône

+ **Essai de la teneur en air** : la teneur en air occlus a été mesurée avec un Aéromètre à mortier.

+ **Essai de compression** : la résistance à la compression au jeune âge et à 28 jours des MBE a été mesurée avec des éprouvettes de dimensions 4x4x16 cm selon la norme [NF EN 196-1]. Les éprouvettes ont été conservées à la température de 20°C et à une humidité relative de 95%.

3. Résultats et discussions

Seize formulations de MBE ont été testées dans le programme expérimental en deux temps : à la sortie du malaxeur (T0) et 90 minutes après la sortie du malaxeur (T90). Les résultats obtenus sont rassemblés synthétiquement dans le Tableau 5 et détaillés par la suite.

Tableau 5. Résultats du programme expérimental.

Paramètres mesurés		A MBE45				B MBE45				A MBE55				B MBE55			
		0%	15%	30%	100%	0%	15%	30%	100%	0%	15%	30%	100%	0%	15%	30%	100%
%SR		0%	15%	30%	100%	0%	15%	30%	100%	0%	15%	30%	100%	0%	15%	30%	100%
% SP		1,2	1,2	1,2	1,6	0,9	0,9	0,9	1,2	0,9	0,9	0,9	1,7	0,7	0,7	0,7	0,9
Etalement [mm]	T0	270	260	290	270	300	270	280	300	260	290	270	280	300	300	290	300
	T90	225	220	210	100	250	250	250	90	220	210	200	100	270	270	200	100
% Air	T0	7,9	5,8	8	9,8	4,2	3,5	4	12,5	6	4,5	7,6	9,4	4,4	5,8	5,6	11
	T90	8,1	6	7,2	9,8	4,4	3,5	5	11,5	6,4	5,2	7,2	9,4	4,1	5	5,8	10
Rc [MPa]	1 jour	25	20	18	15	35	29	25	23	15	14	12	9	25	22	18	13
	7 jours	40	34	33	27	47	42	39	36	31	30	24	20	38	32	29	26
	28 jours	50	45	42	38	49	43	40	37	44	42	37	33	40	38	34	28

Les pourcentages d'adjuvant donnés dans ce tableau ont été ajustés en fonction du pourcentage de substitution en sable recyclé et du couples ciment/adjuvant afin d'obtenir un étalement de 280 ± 20 mm. L'évolution du pourcentage d'adjuvant en fonction du pourcentage de SR est représentée la Figure 3.

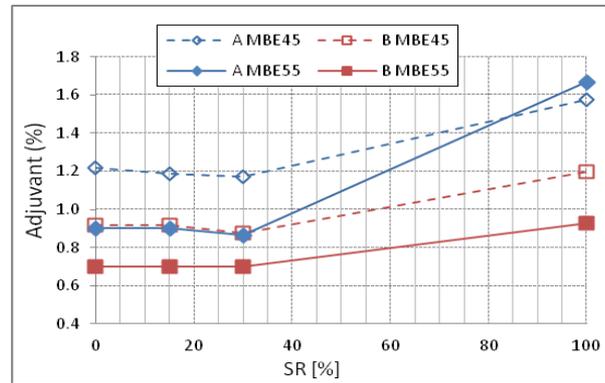


Figure 3. Pourcentage d'adjuvant utilisé en fonction du couple ciment/adjuvant et du pourcentage de substitution afin de maintenir un étalement de 280 mm à l'instant initial (T_0).

Les résultats montrent qu'en dessous de 30% de substitution le taux de super-plastifiant à utiliser pour maintenir un étalement de 280 ± 20 mm à T_0 est quasiment constant. Au-delà de 30% de SR, le pourcentage d'adjuvant nécessaire augmente significativement. Effectivement, le SR absorbe beaucoup plus d'eau que le SN [Gutiérrez 2009; Tegguer 2012; Rueda et al. 2015; Zhao et al. 2015; Silva et al 2014; Crensil et al 2001; Kebaili et al. 2015]. Ainsi, pour maintenir un étalement de 280 ± 20 mm lorsque le pourcentage de substitution est plus élevé la demande en adjuvant est logiquement plus importante. Ces résultats confirment ceux d'autres études [Sua-Iam and Makul 2013; Tegguer 2012; Abbas et al. 2009].

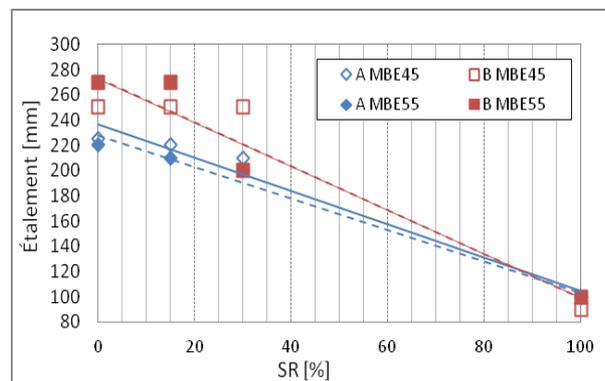


Figure 4. Evolution de l'étalement à T_{90} en fonction du pourcentage de SR pour les 4 configurations.

Concernant l'étalement à T_{90} , pour les deux MBE testés correspondant aux deux rapports E/C différents, les résultats dans la figure 4 montrent une baisse progressive de l'étalement en fonction de l'augmentation du pourcentage de SR. Ces résultats montrent également que la nature des couples ciment/adjuvant a un impacte sur l'étalement et l'évolution de ce dernier au dosage inférieur à 100% du SR. Néanmoins, elle n'influe pas sur l'étalement correspondant à 100% du SR.

Ces résultats sont expliqués par le fait que l'absorption d'eau du sable recyclé est plus élevée à cause notamment du ciment attaché à ce dernier. De plus, le sable recyclé a une compacité plus faible que celle du sable naturel et une rugosité de surface importante [Sua-Iam and Makul 2013; Tegguer 2012; Abbas et al. 2009].

Les résultats des essais de teneur en air sont présentés sur la Figure 5.

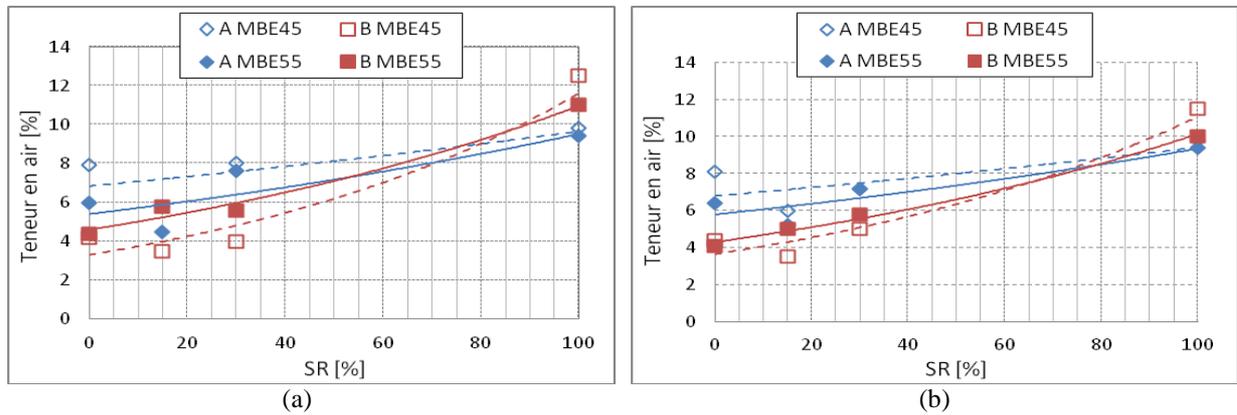


Figure 5. Evolution de la teneur en air en fonction du pourcentage de SR pour différents couples ciment/adjuvant : (a) à l'instant initial T_0 ; (b) après 90 minutes T_{90}

La Figure 5 montre que la teneur en air des MBE augmente avec l'accroissement du pourcentage de SR quelque soit le couple ciment/adjuvant. L'augmentation constatée semble logique, effectivement, d'une part, le sable recyclé à une porosité plus importante que celle du sable naturel, d'autre part, la forme et la rugosité des granulats recyclés empêchent les bulles d'air de s'extraire du béton malgré la vibration [Topçu and Şengel 2004; Rafat et al 2008; Maier and Durham 2012; Rao et al 2007; Rafat et al 2009; Fathifazl et al. 2011; Arezoumandi et al. 2014].

Les résultats des essais mécaniques au jeune âge et à 28 jours sont consignés sur la figure 6.

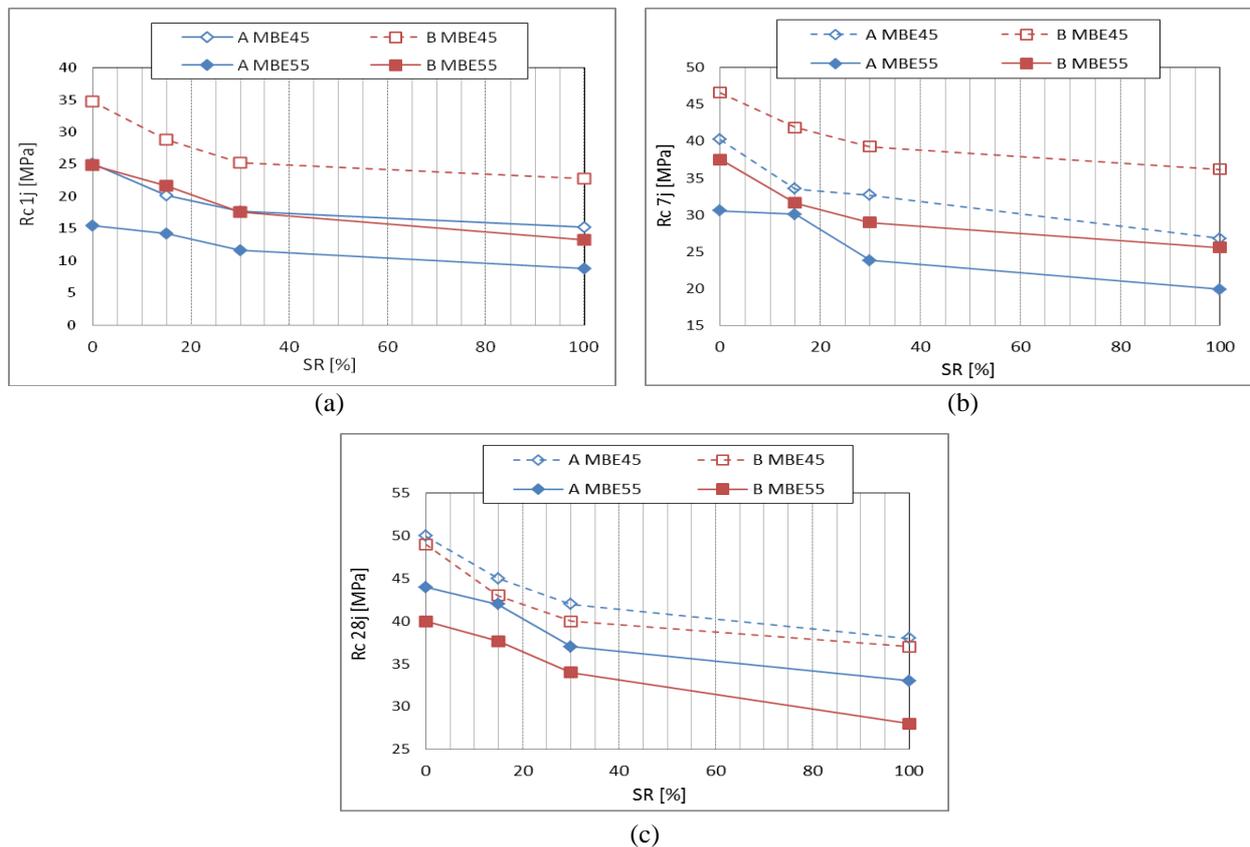


Figure 6. Evolution de la résistance en compression en fonction du pourcentage de SR pour différents couples ciment/adjuvant : (a) à 1 jour ; (b) à 7 jours ; (c) à 28 jours

La Figure 6 montre que la résistance au jeune âge et à 28 jours des MBE diminue lorsque le pourcentage de substitution en SR augmente. Ceci est logique compte tenu de l'augmentation de la teneur en air des MBE quand le pourcentage de SR augmente. De plus, la présence de l'ancien ciment collé sur les SR affaiblit la structure du mélange et augmente la porosité, ce qui facilite la rupture. Ces résultats montrent également que pour un même dosage de substitution la résistance baisse avec l'augmentation du rapport E/C. Ce résultat est cohérent avec la littérature. [Yang et al 2009; Sagoe-Crentsil et al 2001; Topçu and Şengel 2004; Siddique, Khatib, and Kaur 2008; Maier and Durham 2012; Rao, Jha, and Misra 2007; Rafat et al 2009; Arezoumandi et al. 2014]. Par ailleurs, le couple ciment/adjuvant a une influence non négligeable sur la résistance à la compression. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par Crentsil [Sagoe-Crentsil et al. 2001]. Ce dernier a montré que la résistance en compression dépend de la nature du ciment et notamment du C₂S.

4. Conclusions

Seize formulations de MBE ont été testées à différents dosages de substitution du sable naturel par du sable recyclé (0%, 15%, 30% et 100%). Les résultats des essais de maniabilité, de teneur en air et de résistance au jeune âge et à 28 jours ont montré que :

Premièrement, pour des pourcentages de substitutions inférieurs à 30%, le besoin en adjuvant est pratiquement le même. En revanche, au-delà le pourcentage d'adjuvant doit être augmenté significativement pour maintenir le même étalement des MBE.

Deuxièmement, après 90 minutes l'étalement des MBE diminue progressivement lorsque le pourcentage de SR augmente. Bien que, cette décroissance soit clairement impactée par la nature du couple ciment/adjuvant, à 100% de substitution le couple ciment/adjuvant n'a plus d'influence.

Troisièmement, dans la mesure où le sable recyclé a une porosité plus importante, une forme et une rugosité différentes du sable naturel cela entraîne une augmentation de la teneur en air notamment lorsque le pourcentage de SR augmente et ce quelque soit le couple ciment/adjuvant.

Finalement, les résultats montrent que la résistance au jeune âge et à 28 jours des MBE diminue avec l'augmentation du pourcentage de SR et que le choix du couple ciment/adjuvant influe sur la résistance à la compression. Ces résultats confirment ceux obtenus dans la littérature. Ces nouveaux résultats mettent en évidence l'effet de la nature du couple ciment/adjuvant et l'effet du sable recyclé sur les propriétés des MBE à l'état frais et durci. Cela permet d'appréhender le comportement des bétons confectionnés avec du sable et des granulats recyclés.

5. Bibliographie

- Abbas, Abdelgadir, Gholamreza Fathifazl, O. Burkan Isgor, a. Ghani Razaqpur, Benoit Fournier, and Simon Foo. 2009. "Durability of Recycled Aggregate Concrete Designed with Equivalent Mortar Volume Method." *Cement and Concrete Composites* 31 (8) (September): 555–563.
- Arezoumandi, Mahdi, Adam Smith, Jeffery S. Volz, and Kamal H. Khayat. 2014. "An Experimental Study on Shear Strength of Reinforced Concrete Beams with 100% Recycled Concrete Aggregate." *Construction and Building Materials* 53 (February): 612–620.
- De Juan, Marta Sánchez, and Pilar Alaejos Gutiérrez. 2009. "Study on the Influence of Attached Mortar Content on the Properties of Recycled Concrete Aggregate." *Construction and Building Materials* 23 (2) (February): 872–877.
- Djerbi Tegger, A. 2012. "Determining the Water Absorption of Recycled Aggregates Utilizing Hydrostatic Weighing Approach." *Construction and Building Materials* 27 (1) (February): 112–116.
- Fathifazl, Gholamreza, a. Ghani Razaqpur, O. Burkan Isgor, Abdelgadir Abbas, Benoit Fournier, and Simon Foo. 2011. "Creep and Drying Shrinkage Characteristics of Concrete Produced with Coarse Recycled Concrete Aggregate." *Cement and Concrete Composites* 33 (10) (November): 1026–1037.

- H. SOUALHI thèse 2014. "Optimisation de La Viscosité Des Bétons À Faible Impact Environnemental". Université de Cergy-Pontoise.
- Kebaïli, Oussama, Michel Mouret, Nourredine Arabi, and Franck Cassagnabere. 2015. "Adverse Effect of the Mass Substitution of Natural Aggregates by Air-Dried Recycled Concrete Aggregates on the Self-Compacting Ability of Concrete: Evidence and Analysis through an Example." *Journal of Cleaner Production* 87 (January): 752–761.
- Maier, Patrick L., and Stephan a. Durham. 2012. "Beneficial Use of Recycled Materials in Concrete Mixtures." *Construction and Building Materials* 29 (April): 428–437.
- Ngo, T.T., E.H. Kadri, R. Bennacer, and F. Cussigh. 2010. "Use of Tribometer to Estimate Interface Friction and Concrete Boundary Layer Composition during the Fluid Concrete Pumping." *Construction and Building Materials* 24 (7) (July): 1253–1261.
- NGO, Tien-Tung. thèse 2009. "Influence de La Composition Des Bétons Sur Les Paramètres de Pompage et Validation D'un Modèle de Prévion de La Constante Visqueuse". Université de Cergy-Pontoise.
- NF EN 196-1 Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques 2006, (4) (April): P15-471-1
- NF EN 12620+A1 Granulats pour béton 2008, (6) (June): P18-601.
- Rao, Akash, Kumar N. Jha, and Sudhir Misra. 2007. "Use of Aggregates from Recycled Construction and Demolition Waste in Concrete." *Resources, Conservation and Recycling* 50 (1) (March): 71–81.
- Rueda, Jorge, Enrique Dapena, Pilar Alaejos, and Susana Menéndez de Llano. 2015. "An Accelerated Test to Assess the Quality of Recycled Concrete Sands Based on Their Absorption Capacity." *Construction and Building Materials* 78 (March): 464–469.
- Sagoe-Crentsil, K.K., T. Brown, and A.H. Taylor. 2001. "Performance of Concrete Made with Commercially Produced Coarse Recycled Concrete Aggregate." *Cement and Concrete Research* 31 (5) (May): 707–712.
- Siddique, Rafat, Jamal Khatib, and Inderpreet Kaur. 2008. "Use of Recycled Plastic in Concrete: A Review." *Waste Management (New York, N.Y.)* 28 (10) (January): 1835–52.
- Siddique, Rafat, Geert De Schutter, and Albert Noumowe. 2009. "Effect of Used-Foundry Sand on the Mechanical Properties of Concrete." *Construction and Building Materials* 23 (2) (February): 976–980..
- Silva, R.V., J. de Brito, and R.K. Dhir. 2014. "Properties and Composition of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste Suitable for Concrete Production." *Construction and Building Materials* 65 (August): 201–217.
- Sua-Iam, Gritsada, and Natt Makul. 2013. "Use of Recycled Alumina as Fine Aggregate Replacement in Self-Compacting Concrete." *Construction and Building Materials* 47: 701–710.
- Topçu, İlker Bekir, and Selim Şengel. 2004. "Properties of Concretes Produced with Waste Concrete Aggregate." *Cement and Concrete Research* 34 (8) (August): 1307–1312.
- Wallevik, Olafur Haraldsson, and Jon Elvar Wallevik. 2011. "Rheology as a Tool in Concrete Science: The Use of Rheographs and Workability Boxes." *Cement and Concrete Research* 41 (12) (December): 1279–1288.
- Yang, Keun-hyeok, Heon-soo Chung, and Ashraf F Ashour. 2009. "Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties" (105).
- Zhao, Zengfeng, Sébastien Remond, Denis Damidot, and Weiya Xu. 2015. "Influence of Fine Recycled Concrete Aggregates on the Properties of Mortars." *Construction and Building Materials* 81 (April): 179–186.