



HAL
open science

Étude expérimentale de la formulation des mortiers à base de sable recyclé

Layachi Berredjem, Laurent Molez, Van-Minh Nguyen, Houria Meftah,
Nourredine Arabi

► **To cite this version:**

Layachi Berredjem, Laurent Molez, Van-Minh Nguyen, Houria Meftah, Nourredine Arabi. Étude expérimentale de la formulation des mortiers à base de sable recyclé. 34èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil (RUGC 2016), May 2016, Liège, Belgique. hal-01366545

HAL Id: hal-01366545

<https://hal.science/hal-01366545>

Submitted on 29 Mar 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Étude expérimentale de la formulation des mortiers à base de sable recyclé

Berredjem Layachi¹, Molez Laurent², Nguyen Van-Minh³, Mefteh Houria⁴ et Arabi Nouredine⁵

¹ Université Badji Mokhtar – Annaba - Algérie, Département de Génie Civil, Laboratoire Matériaux Géomatériaux et Environnement, berredjem2423@gmail.com;

² INSA de Rennes, Département de Génie Civil, Laboratoire GCGM, Laurent.Molez@insa-rennes.fr;

³ INSA de Rennes, Département de Génie Civil, Laboratoire GCGM, Van-Minh.Nguyen@insa-rennes.fr;

⁴ Université Badji Mokhtar – Annaba - Algérie, Lab. Mat. Géomat. et Environnement, mefteh.houria@yahoo.fr;

⁵ Université Badji Mokhtar – Annaba - Algérie, Département de Génie Civil, nouredine.arabi@univ-annaba.dz.

RÉSUMÉ: Ce travail est une contribution expérimentale à l'étude de l'incorporation du sable recyclé dans les mortiers de ciment et leurs influences sur les comportements rhéologiques et mécaniques de ces mortiers avec et sans adjuvants. A la suite de l'identification et la caractérisation des sables en particulier les recyclés, le comportement rhéologique s'est porté sur différents mélanges de mortiers à base du ciment CEM I 52,5 et avec E/C=0,5, en substituant le sable naturel par le sable recyclé avec différents pourcentages volumiques de : 0, 15, 30, 40, 50, 75 et 100 %.

Les résultats obtenus montrent que le sable recyclé a une absorption d'eau très importante, sept fois plus élevée que celle du sable naturel alluvionnaire, un pourcentage élevé des fillers de 5% en moyenne. Les propriétés physico-chimiques assez faibles par rapport au sable naturel, dues à l'hétérogénéité et le grand pourcentage d'ancien mortier que contient le sable recyclé. Cependant, l'étude comparative entre les différentes compositions de mortiers de sable recyclé a montré des comportements physiques et rhéologiques comparables et des performances mécaniques meilleures à ceux du mortier témoin à base de sable naturel pour toutes les échéances.

This work is an experimental contribution to the study of the incorporation of recycled sand in cement mortars and their influences on the rheological and mechanical behavior of mortars with and without adjuvants. Following the identification and characterization of sands and particularly recycled sands, the rheological behavior was made on various mixtures of mortars of 52,5 CEM I cement and with W/C = 0,5, substituting natural sand by the sand recycled with different volume percentages of 0, 15, 30, 40, 50, 75 and 100%.

The results show that recycled sand has a very high water absorption, seven times higher than the natural alluvial sand, a high percentage of fillers 5% on average. The physicochemical properties quite low compared to natural sand, due to the heterogeneity and the large percentage of old mortar that contains recycled sand. However, the comparative study between the different compositions of recycled sand mortars showed comparable physical and rheological behavior and better mechanical performance than the control mortar based on natural sand for all maturities.

MOTS-CLÉS: Environnement, sable recyclé, mortier, comportement rhéologique, propriétés mécaniques.

KEYWORDS: Environment, recycled sand, mortar, rheological behavior, mechanical properties.

1. Introduction

Aujourd'hui, le recyclage des déchets de construction et de déconstruction (DCD), comme source de granulats pour béton, est considéré comme très important dans la tentative générale pour la protection de l'environnement et pour la promotion des principes de développement durable. Dans ce contexte, réussir à fabriquer du béton tout en économisant les granulats naturels est un enjeu majeur. Actuellement en Europe le taux moyen de recyclage est de 50%, et afin d'augmenter la valorisation des déchets et de réduire la consommation de granulats naturels (GN), un objectif a été ciblé d'ici 2020 pour la valorisation de 70% en poids des déchets non dangereux de construction et de démolition [DIR 08]. L'utilisation des granulats recyclés (GR) en travaux routiers est déjà bien développée et plusieurs travaux ont été réalisés pour étudier l'utilisation des GR en remplacement partiel ou total des (GN) dans la fabrication de nouveaux bétons. En France, le projet national RECYBETON et le projet ANR ECOREB s'intéressent à lever les verrous technologiques concernant ce type de granulat afin de mieux maîtriser leur utilisation et de les introduire encore d'avantage dans le contexte normatif [CHA 11].

L'expérience Européenne dans le domaine peut être élargie à un pays comme l'Algérie, où l'interdiction d'extraction des matériaux alluvionnaires, les difficultés de mise en place de nouvelles exploitations de carrières et la saturation des décharges publiques imposent de rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement en granulats pour béton afin de répondre aux besoins des grands chantiers mis en œuvre. Ce pays dispose d'un gisement significatif de matériaux de déconstruction, de nombreux bâtiments construits pendant les années 70 et 80 dégradés et arrivent en fin de vie et devraient générer de conséquentes quantités de béton dans les années à venir. Malheureusement, les travaux de recherche sur la valorisation des déchets dans le bâtiment et les travaux publics sont rares [ARA 11 et KEN 11,].

Au cours des dernières années, les recherches sont orientées beaucoup plus sur l'utilisation du gravier recyclé dans le béton mais peu d'études existent sur l'utilisation de la fraction fine (< 5 mm) [GOM 13]. Cette dernière est composée de mortier durci, elle nécessite une grande demande en eau, qui n'est pas constante le plus souvent, ce qui le rend plus difficile à recycler dans le béton et dans les mortiers par rapport au sable usuel [ZHA 15].

Lors du concassage du vieux béton une quantité importante de fraction fine est inévitable et qui est constituée en majeure partie, de la pâte cimentaire durci caractérisée par sa porosité élevée ce qui le rend plus difficile à recycler dans le béton et dans les mortiers par rapport au gravier. Plusieurs chercheurs considèrent que cette fraction est nocive à la durabilité des bétons dont son ressort est la décharge, par contre d'autres études limitent son utilisation dans le nouveau béton à un seuil de 20% à 30% comme pourcentage de remplacement des sables naturels [BRA 12 et ZHA 15].

Les (GR) se caractérisent par une plus faible densité, une absorption d'eau beaucoup plus élevée et des résistances mécaniques inférieures à celles des (GN) [PED 14 et ARA 11]. Ceci est expliqué par la porosité élevée de la pâte cimentaire, qui influence les propriétés des bétons et mortiers à base des recyclés à l'état frais et durci. De nombreux auteurs ont conclu que la substitution des granulats naturels par les recyclés, engendre une augmentation de la quantité d'eau de gâchage nécessaire, menant à des difficultés de contrôle de la rhéologie à l'état frais et par conséquent provoque des pertes de résistances à la compression, à la flexion ainsi que le module d'élasticité [PED 14 et NEN 14].

L'objectif de ce travail est une contribution expérimentale à l'étude de l'incorporation du sable recyclé dans les mortiers de ciment et leurs influences sur les comportements rhéologiques et mécaniques de ces mortiers avec et sans adjuvants. A la suite de l'identification et la caractérisation des sables, le comportement rhéologique s'est porté sur différents mélanges de mortiers à base du ciment CEM I 52,5 et avec E/C = 0,5, en substituant le sable naturel par le sable recyclé avec différents pourcentages volumiques de : 0, 15, 30, 40, 50, 75 et 100 %.

2. Matériaux et procédures expérimentales

2.1. Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans cette étude sont :

- Un ciment Portland artificiel CEM I 52,5, d'une densité relative de 3,15, produit par la cimenterie de LAFARGE du Teil – France, conforme à la norme EN 197-1.

- Deux types de sables de fraction (0/3,15) : un sable naturel alluvionnaire (SN) et sable recyclé (SR), fabriqué au laboratoire. Il est obtenu à la suite d'écrasement d'éprouvettes de béton ordinaire âgé moins de 3 mois de résistance variable (en moyenne 30 MPa) et concasser dans un concasseur à mâchoire ;
- Eau de gâchage utilisée : eau de robinet exempte de toutes impuretés ;
- Un Superplastifiant/Haut réducteur d'eau (Sika Viscocrete TEMPO 11), conforme à la norme NF EN 934-2, plage de dosage de 0,3 à 3,0% du poids du liant, masse volumique de 1,06 kg/m³ et l'extrait sec = 30,0 ± 1,5%

2.2. Caractérisation des matériaux

2.2.1. Analyses granulométriques :

Les analyses granulométriques des sables sont réalisées selon la norme NF EN 933-1, figure 1.

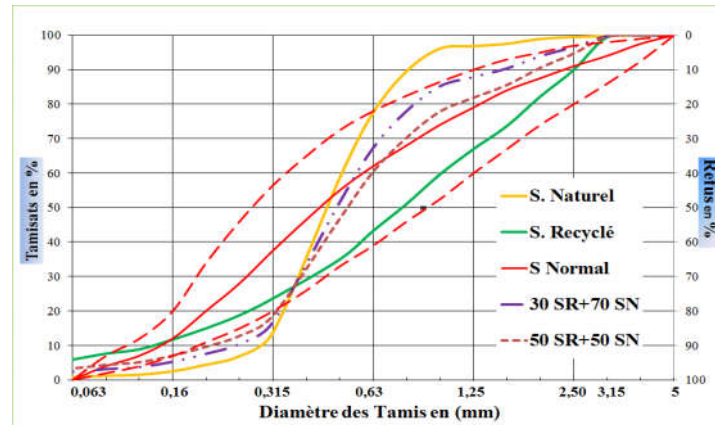


Figure 1. Courbes granulométriques des sables utilisés.

De la figure 1, on constate que la granulométrie du sable recyclé est uniforme mais c'est un sable plutôt grossier avec un MF = 2,94, alors le sable naturel ne s'intègre pas dans le fuseau de référence selon la méthode Dreux-Gorisse [DRE 98], il est constitué en majorité par la fraction (0,315/1,25). En faisant une substitution volumique du sable naturel par du sable recyclé, on obtient des sables plus au moins normaux (50 % SN + 50 % SR ou 70% SN + 30%SR).

2.2.2. Caractéristiques physiques :

Les caractéristiques physiques sont déterminées conformément aux normes en vigueur et les résultats d'essais sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Les caractéristiques physiques des sables utilisés

Caractéristiques physiques	Unité.	SN (0/3,15)	SR (0/3,15)	Normes
Masse volumique apparente	kg/m ³	1238	1406	NF EN 1097-3
Masse volumique réelle	kg/m ³	2588	2581	NF EN 1097-6
Module de finesse	MF	2,38	2,94	NF EN 933-1
Teneur en fines (<63 µm)	TF (%)	0,40	5,62	NF EN 933-1
Equivalent de sable	ES (%)	92,52	87,33	NF EN 933-8
Teneur en eau	W (%)	1,12	2,91	NF P 94-050
Absorption d'eau	Abs (%)	2,19	11,37	NF EN 1097-6

D'après le tableau 1, on remarque que le sable naturel est un sable un peu fin et le sable le recyclé est un peu grossier, les deux sables sont propres et ont presque la même masse volumique réelle. Le sable recyclé a une masse volumique proche de celle du béton source, fabriqué avec un gravier présentant une masse volumique importante (supérieur à 2700 kg/m³). L'absorption d'eau du sable recyclé est importante, cinq fois plus élevée que celle du sable naturel. Cette valeur semble élevée par rapport à celle relevée dans la littérature [ZHA 15 ; LE 15 ; GOM 13]. Cela peut être expliqué par la porosité importante du vieux mortier constituant le sable recyclé et la proportion importante de fines (> 5%) présentant une surface spécifique très élevée.

3. Méthodes et formulation

La formulation des mortiers de ciment est réalisée sur la base de :

- Un rapport "Eau/Ciment = 0,5" et un rapport "Sable/Ciment = 3,0".
- Un dosage en ciment calculé constant pour tous les mélanges, C=506 kg pour un m³ de mortier ;
- Substitutions du sable naturel par le sable recyclé avec différents pourcentages volumiques de : 0, 15, 30, 40, 50, 75 et 100 %.

Les différentes compositions de mortiers de ciment réalisées sont données par le Tableau 2.

Tableau 2. Les différentes Compositions des Mortiers formulés.

Séries	Mortier	Ciment (kg/m ³)	SN (kg/m ³)	SR (kg/m ³)	E (L)	E _{abs} (L)	E _{Tot} (L)	EEff (L)	E _{Tot} /C	E _{Eff} /C	SP (% C)
Série 1	M0	506	1518	0	253	0	253	220	0,50	0,43	-
	M15	506	1290	227	253	20	273	219	0,54	0,43	-
	M30	506	1062	454	253	41	294	219	0,58	0,43	-
	M40	506	911	605	253	54	307	218	0,61	0,43	-
	M50	506	759	757	253	68	321	218	0,63	0,43	-
	M75	506	379	1135	253	102	355	218	0,70	0,43	-
	M100	506	0	1514	253	136	389	217	0,77	0,43	-
Série 2	M15_A	506	1290	227	253	-	253	201	0,50	0,40	0,50
	M30_A	506	1062	454	253	-	253	182	0,51	0,36	1,00
	M40_A	506	911	605	253	-	253	171	0,51	0,34	2,00
	M50_A	506	759	757	253	-	253	161	0,52	0,32	3,00
	M75_A	506	379	1135	253	-	253	130	0,53	0,26	4,00
	M100_A	506	0	1514	253	-	253	102	0,54	0,20	6,00

Le mortier témoin naturel (M0) est formulé à base de sable naturel sec, on a obtenu un mortier un peu plastique et maniable. Tous les autres mortiers sont confectionnés pour avoir la même plasticité. Dans la 1^{ère} série, les sables recyclés (SR) ont subi un pré-mouillage avec une quantité d'eau optimum de 9 % du poids du SR et ils sont malaxés pendant 10 min avant gâchage, et cela pour s'affranchir d'une probable absorption par les granulats recyclés de l'eau de gâchage [MEF 13], figure 2. Le dosage de 9% a été déterminé afin de maintenir la même rhéologie des différents mortiers. Ce dernier reste inférieur à l'absorption mesurée précédemment car celle-ci n'a pas le temps d'être lors de la séquence de malaxage.



Sable naturel sec



Sable recyclé sec



SR mouillé et mélangé pendant 10 min

Figure 2. Photos des états de sables utilisés

Dans la 2^{ème} série, tous les sables sont utilisés à l'état sec et pour avoir la plasticité voulue, un ajout de superplastifiant était nécessaire. La plage utilisée varie de 0,5% (M15) jusqu'à une teneur maximale de 3,0% (M50). La plage recommandée d'utilisation du superplastifiant est dépassée pour les deux derniers mortiers M75_A et M100_A, mais il a été impossible d'obtenir la rhéologie recherchée : ces deux derniers mortiers sont secs à très sec et il n'a pas été possible de les mettre dans les moules par simple vibration.

4. Méthodes expérimentales

4.1. Comportement rhéologique

A l'état frais les masses volumiques, la mesure de l'air occlus, la plasticité et l'affaissement au cône MBE sont mesurés.

4.1.1. Masses volumiques apparentes et air occlus

Les masses volumiques apparentes des mortiers sont déterminées selon la norme NF EN 1015-6. La mesure de l'air occlus est déterminée à l'aide d'un aéromètre à mortier "Controlab" de 1L, selon la norme NF EN 413-2.

4.1.2. Affaissement au cône MBE

L'essai d'affaissement a été effectué à l'aide d'un mini cône MBE (Mortiers de Béton Équivalent), c'est une moule métallique, tronconique (d=50mm, D=100mm et H=150mm). L'essai est réalisé en remplissant le cône métallique en deux couches avec une vibration pendant une durée de 5 s pour chaque couche. On soulève le cône verticalement et on mesure l'affaissement à temps (t=0), ensuite le mortier est vibré pendant (2 s) à une fréquence de 50 Hz et on mesure l'affaissement à (t=2s).



Figure 3. Affaissement au cône MBE. Affaissement à (t = 0) Affaissement à (t = 2 s)

4.1.3. Plasticité des mortiers

La fluidité du mortier est évaluée à l'aide d'un plasticimètre cubique (110x110x110 mm³), fixé sur une table vibrante d'une fréquence de 50 Hz, et muni d'une trappe d'ouverture située à la base de l'une des faces du cube.

Le plasticimètre est rempli de mortier en deux couches, en le vibrant pendant 5 secondes pour chaque couche, la trappe de sortie de forme rectangulaire (10x30 mm²) étant maintenue fermée. La table vibrante est mise en mouvement et on ouvre la trappe de sortie, en déclenchant le chronomètre (t). On recueille soigneusement le mortier qui s'écoule pour le peser (M). Les mesures sont arrêtées quand un temps suffisant est écoulé ou quand le débit devient irrégulier et au plus tard quand le niveau du mortier sera descendu de 2 cm. La plasticité du mortier est caractérisée par le débit massique qui se calcule par la formule 1 :

$$Q = M/t \quad [1]$$

Q : Débit d'écoulement du mortier, (g/s) ;

M : Masse du mortier récupérée à travers de la trappe de sortie du plasticimètre en gramme (g);

t : Temps d'écoulement du mortier en seconde (s).

4.2. Comportement mécanique

Les éprouvettes sont démoulées 24 h après leur fabrication et conservées en immersion dans l'eau à T=20±2°C jusqu'au temps d'essai, conformément à la norme NF EN 12 390-2. Le comportement mécanique des mortiers est évalué à l'aide d'essais de compression, d'essais de fendage et d'essais de flexion 3 points. Ces tests mécaniques sont effectués sur une presse Zwick/Roell de capacité de chargement de 200 KN et selon les normes NF EN 196-1.

Les résistances à la flexion 3 points et en compression uni-axiale des mortiers durcis ont été déterminées sur des éprouvettes prismatiques (40x40x160 mm³) et (40x40x40 mm³) respectivement, et les contraintes de traction par fendage sont déterminées sur des éprouvettes cylindriques (40x80 mm²).

5. Résultats et discussions

5.1. Etat frais

5.1.1. Masses volumiques apparentes à l'état frais et air occlus

Les pourcentages d'air occlus des différents mortiers sont donnés dans le tableau 3. Les masses volumiques calculées sont obtenues à partir de la composition théorique du mortier. Elles ne prennent pas en compte l'air occlus. L'air occlus calculé est obtenu à partir de la masse volumique calculée et la masse volumique réelle.

On remarque dans la 1^{ère} série « mortiers sans adjuvant », que l'air occlus enregistre une augmentation légère avec l'augmentation du taux de substitution du sable naturel par le sable recyclé : elle est de l'ordre de 19% pour le taux de 40%. Par contre dans la 2^{ème} série « Mortiers adjuvantés », le comportement rhéologique est modifié par le superplastifiant, et on constate que l'air occlus diminue avec l'augmentation du remplacement du sable naturel et a fortiori avec l'augmentation du dosage en superplastifiant. Par exemple pour un dosage max du superplastifiant qui de l'ordre de 3%, on enregistre une diminution de l'air occlus de 59%.

Tableau 3. Pourcentage de l'Air Occlus dans les mortiers.

Mortiers	M0	M15	M30	M40	M50	M75	M100	M15_A	M30_A	M40_A	M50_A
A. O. calculé (%)	9,8	12,3	7,7	13,4	10,5	9,4	6,7	12,4	10,4	9,5	5,6
A. O. mesuré (%)	6,4±0,3	7,2±0,5	6,3±0,3	7,6±0,4	7,0±0,3	7,0±0,4	5,7±0,2	6,5±0,4	5,2±0,4	4,5±0,4	2,7±0,3

Les résultats de la masse volumique à l'état frais présentés dans la figure 4 correspondent à une moyenne des valeurs obtenues pour quatre essais.

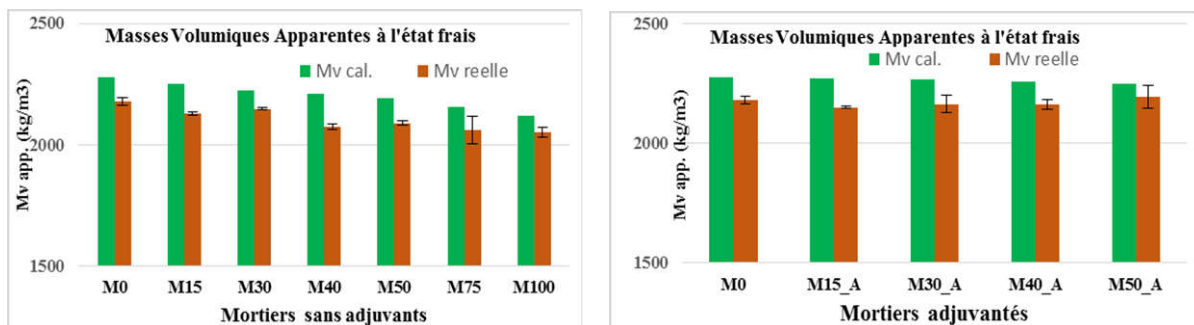


Figure 4. Masses volumiques à l'état frais des différents mortiers.

On observe que les masses volumiques des mortiers sans adjuvants diminuent avec l'augmentation du taux de remplacement du SN par le SR, jusqu'à 6% pour le mortier recyclé 100%. Cela est dû à l'augmentation de la teneur en eau avec l'augmentation de la teneur en sable recyclé. Une légère augmentation des masses volumiques réelles des mortiers adjuvantés est constatée : 1% d'augmentation pour le mortier à 50% de sable recyclé. Comme précédemment, une légère diminution était attendue en raison de l'augmentation légère de la teneur en eau. Cela est probablement dû à l'effet du superplastifiant qui améliore la compacité des mortiers avec un taux d'air occlus de 2,7% seulement pour le mortier M50_A.

5.1.2. Affaissement au cône MBE et débit d'écoulement

Les résultats de l'affaissement au cône MBE et le débit d'écoulement sont représentées dans la figure 5.

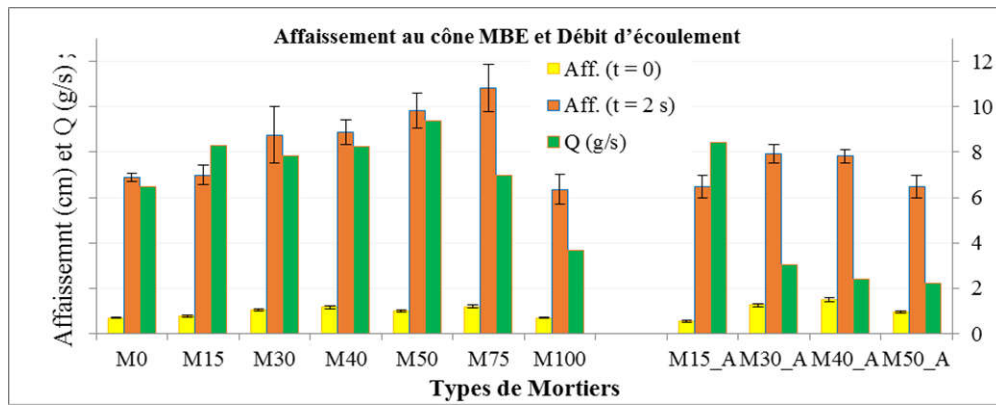


Figure 5. Affaissement au cône MBE et débits d'écoulement des différents mortiers.

La figure 5 montre que l'affaissement au cône MBE augmente avec l'accroissement du taux de SR dans les mortiers. Ces variations sont dues aux différences de granulométrie entre le sable recyclé fin et le sable naturel grossier. L'affaissement à $t=0$ s reste toutefois similaire pour tous les mortiers sans adjuvant. Pour les mortiers adjuvés, les variations d'affaissement sont plus importantes, ce qui peut être lié à un surdosage en superplastifiant. A travers le graphe du débit d'écoulement, on constate que la fluidité des mortiers pour la 1ère série augmente avec l'augmentation du E/C sauf pour le M75 et M100 dont on a eu un colmatage au niveau de la trappe de sortie du plasticmètre. A l'inverse, on remarque que la plasticité des mortiers adjuvés diminue avec l'augmentation du taux du SR.

Ces variations restent toutefois faibles en conséquence de l'objectif de rhéologie constante fixé pour la composition des mortiers.

5.2. Etat durci

5.2.1. Résistances en compression

Les résultats des résistances en compression en fonction du taux de substitution du SN par le SR sont donnés figure 6. Ils correspondent à une moyenne des valeurs obtenues pour trois éprouvettes.

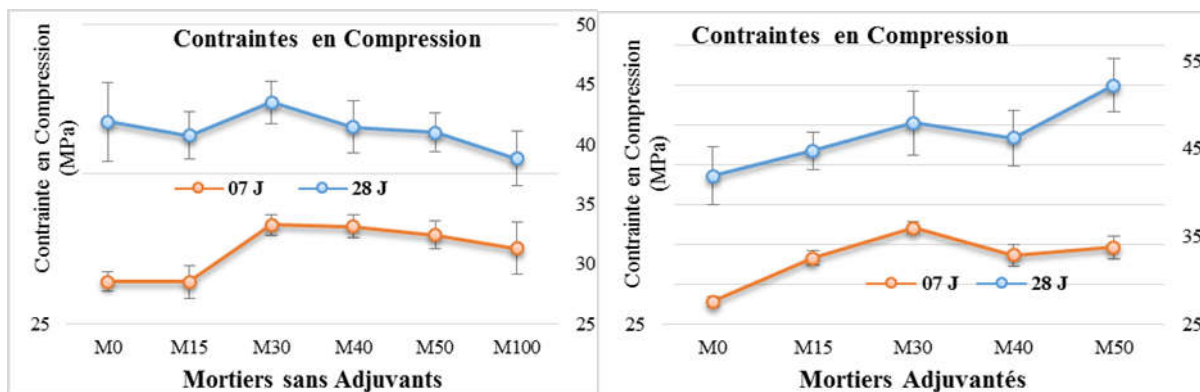


Figure 6. Résistance en compression simple des différents mortiers à 7 et 28 jours

5.2.2. Résistances à la traction par fendage et par flexion 3 points :

Les résistances à la traction par fendage et par flexion 3 points des différents mortiers à 7 et 28 jours de maturation sont représentées dans la figure 7. Les résultats obtenus correspondent à une moyenne des valeurs obtenues pour deux essais.

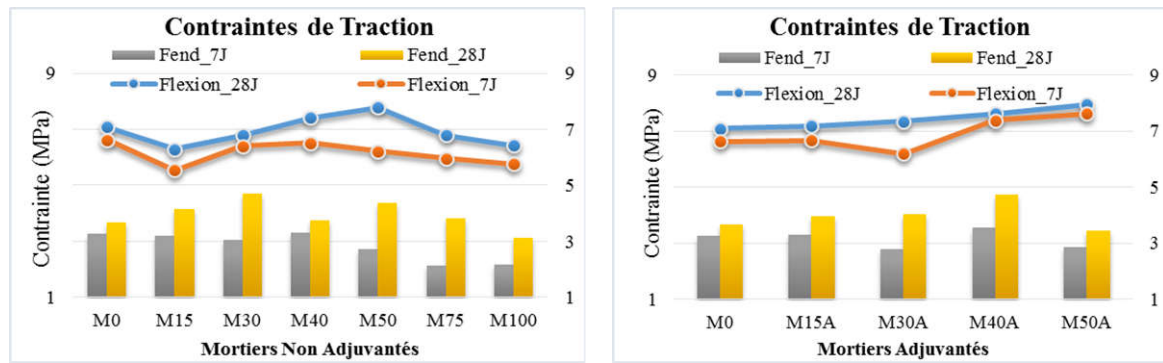


Figure 7. Contraintes de traction par fendage et par Flexion 3 points des différents mortiers à 7 et 28 Jours.

5.2.3. Analyse des résultats de résistances mécaniques

Pour les mortiers non adjuvés (1^{ère} série), les résistances en compression à 7 jours montrent des valeurs plus élevées lors de la substitution du SN par le SR. Toutefois, à 28 jours, toutes les résistances sont quasiment similaires, sauf pour le mortier M30 qui montre une résistance plus élevée et le mortier M100 qui montre une résistance plus faible. Les mêmes tendances sont observées pour les essais de résistance en traction. Dans cette série, le rapport E_{eff}/C est constant ce qui explique les faibles variations de résistance. Le mélange de 70% de SN avec 30% de SR conduit à un sable plus homogène, situé de façon plus idéale dans le fuseau de référence. Cela peut expliquer le gain de résistance mesuré. Les gains constatés à 7 jours peuvent être expliqués par l'existence probable de ciment anhydre dans le SR.

Pour les mortiers adjuvés (2^{ème} série), la résistance en compression à 7 et 28 jours augmente avec le taux de substitution du SN par le SR. La même observation peut être faite pour les résistances en traction. Dans cette série, le rapport E_{eff}/C diminue avec le taux de substitution, ce qui explique les augmentations de résistance. De plus, la teneur en air occlus diminue en fonction du taux substitution, en raison de l'ajout de superplastifiant, ce qui tend de nouveau à augmenter les résistances.

6. Conclusion

Il ressort de cette étude plusieurs constatations :

- Le sable recyclé est caractérisé par un taux élevé de fines supérieur à 5% ce qui conduit à une absorption d'eau : 11,4 %, cinq fois supérieure à celle du sable naturel.
- Pour s'affranchir d'une probable absorption par les granulats recyclés de l'eau de gâchage et pour maintenir l'ouvrabilité désirée des mortiers, un ajout supplémentaire d'eau, équivalent à 9% du poids de SR, est indispensable. L'humidification du SR doit se faire au moins 10 min avant le gâchage. Cet ajout d'eau est inférieur à l'absorption mesurée.
- La meilleure plasticité et la plus grande compacité sont constatées pour le mortier M30, cela est due probablement à l'effet filler.
- Les performances mécaniques en compression, à la traction par fendage et en flexion des mortiers à base de sable recyclé sont toutes meilleures que celles du mortier naturel pour toutes les échéances. A 28 jours, la résistance en compression est améliorée seulement de 4 % pour un taux de sable recyclé de 30% dans le mortier (M30) et de 25 % pour un taux de 50% avec adjuvant (M50_A). Les résistances de traction par flexion et par fendage augmentent avec la substitution du sable naturel par le sable recyclé jusqu'à un optimum de 50% puis elles chutent.
- L'optimum idéal du taux de remplacement de sable naturel par le sable recyclé brut (avec fillers) est de 30% à 40%, sans que toutefois les comportements rhéologiques et mécaniques soient amoindris.
- Suite à cela plusieurs perspectives sont envisagées : étude de l'interface pâte / granulat, étude de la durabilité des mortiers et bétons à base de sable recyclé et de gravier recyclé...

7. Remerciements

Les auteurs de l'article remercient vivement tout le personnel du département de génie civil de l'INSA de Rennes, du laboratoire LGCGM pour l'aide précieuse apportée pour la réalisation de ce travail. Ces travaux ont pu être réalisés en France grâce à la bourse Algérienne PNE15-16 du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique.

8. Bibliographie

- [ARA 11] ARABI N. & BERREDJEM L., «Valorisation des déchets de démolition comme granulats pour bétons», *déchets – revue francophone d'écologie industrielle*, vol. 60, 2011, p. 25-30.
- [BRA 12] BRAGA M., de BRITO J. et VEIGA R., «Incorporation of fine concrete aggregates in mortars», *construction and building Materials*, Vol. 36, 2012, p. 960–968
- [CHA 11] YVES CHARONNAT, « PN RECYBETON, Recyclage Complet des Bétons», Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil, 2011.
- [DIR 08] DIRECTIVE 2008/98/CE du Parlement Européen et du Conseil, novembre 2008, Journal Officiel de l'Union Européenne.
- [DRE 98] DREUX G. ET FESTA J., *Nouveau Guide du Béton*, 8^{ème} édition, Paris, Edition Eyrolles, 1998.
- [GOM 13] GOMART H., GHORBEL E., WARDEH G., «Étude de l'ouvrabilité et des propriétés mécaniques de mortiers à base de sable recyclé», 31^{èmes} Rencontres de l'AUGC, E.N.S. Cachan, Contribution1245, 2013.
- [KEN 11] KENAI S. & DEBIEB F., «Characterization of the durability of recycled concretes using coarse and fine crushed bricks and concrete aggregates», *Materials and Structures*, vol. 44, 2011, p. 815–824.
- [LE 15] LE T., REMOND S., LE SAOUT G. ET GARCIA-DIAZ E., Comportement à l'état frais des mortiers à base de sable recycle – Influence de l'état de saturation, *Conférence Internationale Francophone NoMaD*, Mines de Douai, 2015.
- [MEF 13] MEFTEH H. et AL., «Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete», *Cleaner Production*, vol. 54, 2013, p. 282-288.
- [NEN 14] NENO C., de BRITO J. et VEIGA R., «Using fine recycled concrete aggregate for mortar production», *Materials Research*, vol. 17, n° 1, 2014, p. 168-177.
- [PED 14] PEDRO D., de BRITO J. et EVANGELISTA L., «Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete», *Construction and Building Materials*, vol. 71, 2014, p. 141-151;
- [ZHA 15] ZHAO Z., REMOND S., DAMIDOT D. et XU W., «Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars», *Construction and Building Materials*, vol. 81, 2015, p. 179-186.