

ÉTUDE DE L'OUVRABILITÉ ET DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE MORTIERS À BASE DE SABLE RECYCLÉ

H. GOMAR, E. GHORBEL, G. WARDEH

Laboratoire L2MGC, Université de Cergy-Pontoise, 95031 Neuville-sur-Oise Cedex, Cergy-Pontoise
(hector.gomart@u-cergy.fr)
hector.gomart@u-cergy.fr
elhem.ghorbel@u-cergy.fr
george.wardeh@u-cergy.fr

1. INTRODUCTION

La production de granulats de recyclage est une activité de grande ampleur en France et ne cesse d'augmenter. D'après l'UNPG, Union Nationale des Producteurs de Granulats, la production totale de granulats recyclés en 2007 s'est élevée à 15 millions de tonnes issus essentiellement des travaux de démolitions. De plus, la directive européenne 2008/98/CE a fixé aux États membres un objectif de valorisation des déchets de chantiers du BTP, de l'ordre de 70 % à l'horizon 2020. La valorisation de ces déchets est un enjeu environnemental, permettant de préserver les ressources naturelles des granulats et de réduire les émissions de CO₂ des chantiers du BTP. Dans ce contexte, la réutilisation des granulats issus de la déconstruction est une solution permettant de répondre à la fois aux objectifs économiques et environnementaux.

L'utilisation des granulats recyclés dans le béton hydraulique n'est pas récente et de nombreuses études prouvent qu'un béton formulé avec des granulats recyclés peut avoir des caractéristiques mécaniques satisfaisantes par comparaison à celles d'un béton traditionnel formulé avec des

granulats naturels [EVA 07]. Cependant, la majorité des études se limitent à l'utilisation de gravillons et très peu se sont intéressées à la substitution du sable naturel par un sable recyclé. Les travaux disponibles se sont limités à la caractérisation des propriétés mécaniques en fonction du taux de substitution du sable. Récemment les auteurs ont présenté une étude [GOM 12] qui montrait l'influence du sable recyclé sur les propriétés à l'état frais et le comportement mécanique, en se limitant à des mortiers à ouvrabilité variable. Les résultats ont montré une diminution de l'ouvrabilité et de la résistance mécanique en fonction du taux de substitution, avec des propriétés mécaniques relativement élevées de l'ordre de 75% par rapport au mortier de référence.

L'objectif de ce présent travail est de déterminer l'influence de la substitution volumique du sable naturel par du sable recyclé, ainsi que l'influence du rapport E/C , sur les propriétés à l'état frais et les caractéristiques mécaniques de mortiers. Pour ce faire, deux séries de mortiers ont été fabriquées en substituant le sable naturel par un sable recyclé, l'une en maintenant les dosages en constituants constants, l'autre à ouvrabilité constante. À l'état

frais, des mesures du taux d'air occlus et de l'affaissement ont été réalisées de façon systématique sur l'ensemble des échantillons. L'évolution de l'ouvrabilité au cours du temps a également été étudiée. À l'état durci, la microstructure a été finement décrite par des essais de porosité accessible à l'eau, complétés par des mesures de porosité par intrusion mercure. La résistance à la compression et le module d'élasticité dynamique ont été mesurés sur des éprouvettes à l'âge de 28 jours. Des corrélations entre les propriétés mécaniques et les paramètres microstructuraux (porosité totale, taux d'air occlus) ont été établies.

2. FORMULATION

2.1. Matériaux utilisés

Les mortiers ont été fabriqués en utilisant :

- un ciment Calcia de type CEM I – 52,5 N CE CP2, en conformité avec la norme NF EN 197-1,
- un superplastifiant Cimfluid 3002, produit par la société Axim Italcementi. Le pourcentage d'extrait sec est de 35% et est conforme à la norme EN 934-2,
- un sable naturel de type silico-calcaire roulé de classe granulaire 0/4,
- un sable recyclé issu du tamisage au laboratoire de granulats provenant d'une usine de retraitement des matériaux de démolition.

Les propriétés des deux types de sable sont données dans le Tableau 1. On remarque que l'équivalent de sable du recyclé (défini par la norme NF EN 933-8) est inférieur à celui du sable naturel, mais correspond tout de même à un sable propre, apte à la fabrication des mortiers. La compacité du sable recyclé est également inférieure à celle du sable naturel. En revanche le sable recyclé présente un coefficient d'absorption (WA_{24}), mesuré selon la norme NF EN 1097-6, bien supérieur à celui du sable naturel. Ceci est dû à la présence de la matrice cimentaire dans le sable recyclé.

La distribution granulométrique de ces deux types de sables a été mesurée par la méthode classique de tamisage décrite dans la norme EN 933-1. Les mesures ont été effectuées à cinq reprises et les résultats donnés ci-après correspondent à la moyenne de ces valeurs. Les courbes granulométriques représentées à la Figure 1 montrent que les deux sables possèdent des répartitions granulométriques

proches l'une de l'autre. Cependant, le sable recyclé est plus riche en éléments fins que le sable naturel et possède un module de finesse plus faible quoique admissible pour la formulation d'un béton classique (cf. Tableau 1).

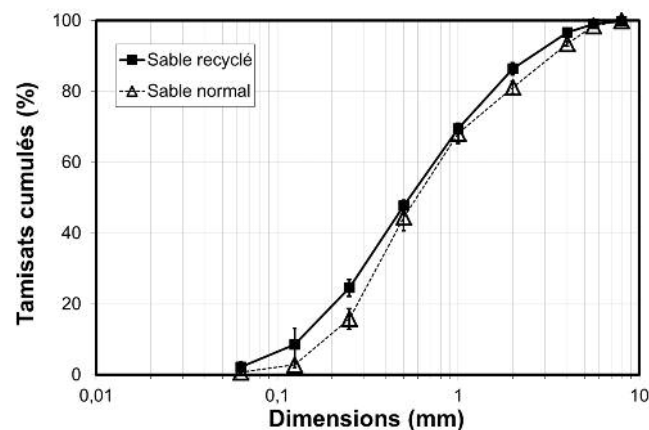


Figure 1. Courbes granulométriques du sable normal et du sable recyclé.

2.2. Formulation des mortiers

Deux séries de mortiers ont été élaborées en remplaçant une partie du sable naturel par du sable recyclé. Le mortier de référence correspond au mortier de béton équivalent (MBE) d'un béton ordinaire de classe S4 (étalement 18 ± 2 cm) et de résistance à la compression $f_{c,28} = 30$ MPa [MOH 11]. Pour chaque série, le taux de substitution volumique varie entre 0% et 100%. Les sables naturels et recyclés ont été séchés au préalable à l'étuve à 110 ± 5 °C, jusqu'à stabilisation de la masse. Dans ce qui suit on définit l'eau efficace, E_{eff} , la quantité d'eau totale, E_{tot} , de laquelle on soustrait celle absorbée par le sable, M_s , dans l'hypothèse où le phénomène est considéré rapide et ayant lieu pendant la période de malaxage ($E_{eff} = E_{tot} - WA_{24} \times M_s$). Cette hypothèse est discutable mais correspondrait à un mode opératoire dans lequel les granulats seraient introduits à l'état humide. Les compositions massiques des deux séries sont données dans le Tableau 2. On remarque que :

	Sable naturel	Sable recyclé
Compacité (%)	89,5	85,8
Équivalent de sable (%)	85	72
Coefficient d'absorption d'eau WA_{24} (%)	1,7	9,0
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2550	2145
Module de finesse	2,82	2,66

Tableau 1. Propriétés des granulats

- La première série (série 1) est à ouvrabilité variable. Elle est formulée en maintenant constants les dosages en ciment, en eau totale et en superplastifiant [GOM 12]. Il est à noter qu’au-delà de 75% ce mortier ne peut plus être mis en œuvre par manque d’ouvrabilité ; le taux de substitution à 100% n’a donc pas été formulé. On remarque que le rapport E_{eff}/C diminue, puisqu’à eau totale fixe, la quantité du sable recyclé, fortement poreux, augmente.
- La seconde (série 2) a été formulée pour les mêmes taux de substitution volumique en sable, mais de telle sorte que l’ouvrabilité reste constante (classe S4), en jouant sur le volume d’eau et sans modifier la quantité de superplastifiant.

Les mortiers ont été élaborés dans un malaxeur à béton en mélangeant dans un premier temps les matériaux secs pendant 1 min, puis 4 min après l’ajout de l’eau mélangée au superplastifiant. Tous les mortiers ont été mis en place à la table vibrante.

3. PROPRIÉTÉS DES MORTIERS À L’ÉTAT FRAIS

Les propriétés à l’état frais des deux séries de mortiers ont été analysées. Les résultats de la masse volumique reportés au Tableau 3 correspondent à une moyenne des valeurs obtenues pour cinq essais. Globalement, la masse volumique du mortier diminue avec l’augmentation du taux de substitution du sable naturel par le sable recyclé, ce qui est conforme à nos attentes puisque la masse volumique du sable recyclé est inférieure à celle du sable naturel (Tableau 1).

Des mesures de l’air occlus ont été réalisées (aéromètre CONTROLS / 1L). On observe un accroissement de l’air occlus pour les deux séries de mortiers. Cet accroissement est comparable pour les deux séries ; pour un taux de substitution de 75%, l’air occlus enregistre une augmentation de l’ordre de 73% pour la série 1 et 87% pour la série 2.

	SR 0%	SR 30%	SR 50%	SR 75%	SR 100%
<i>Série 1 – ouvrabilité variable</i>					
Ciment (kg/m ³)	600	600	600	600	—
Eau totale E_{tot} (kg/m ³)	280	280	280	280	—
E_{eff}/C	0,47	0,42	0,39	0,34	—
Sable naturel (kg/m ³)	1275	893	637	318	—
Sable recyclé (kg/m ³)	—	326	544	816	—
Superplastifiant (kg/m ³)	1	1	1	1	—
Masse volumique théorique (kg/m ³)	2156	2100	2062	2015	—
<i>Série 2 – ouvrabilité constante (18 ± 2 cm)</i>					
Ciment (kg/m ³)	600	576	559	544	528
Eau totale E_{tot} (kg/m ³)	280	306	326	343	361
E_{eff}/C	0,47	0,48	0,50	0,51	0,52
Sable naturel (kg/m ³)	1275	858	593	288	—
Sable recyclé (kg/m ³)	—	313	507	740	957
Superplastifiant (kg/m ³)	1	1	0,9	0,9	0,9
Masse volumique théorique (kg/m ³)	2156	2054	1986	1915	1846

Tableau 2. Composition des deux séries de mortiers de sables recyclés

	SR 0%	SR 30%	SR 50%	SR 75%	SR 100%
<i>Série 1 – ouvrabilité variable</i>					
Air occlus (%)	1,5±0,3	2,1±0,4	2,8±0,3	2,6±0,4	—
Masse volumique (kg/m ³)	2139±9	2066±7	2062±3	2052±8	—
Affaissement (cm)	12,0	5,0	2,3	0	
<i>Série 2 – ouvrabilité constante (18 ± 2 cm)</i>					
Air occlus (%)	1,5±0,3	2,0±0,5	3,0±0,4	2,8±0,1	3,0±0,4
Masse volumique (kg/m ³)	2139±9	2105±7	2096±8	2029±15	1970±6

Tableau 3. Propriétés à l’état frais des deux séries de mortiers.

Cette augmentation est probablement liée à l'excédent d'eau contenu dans les mortiers qui en s'évaporant génère des bulles d'air piégé (air occlus plus important pour la série 2). Elle peut également être due à la moins bonne compacité du sable recyclé. L'un des effets des vides provoqués par l'air occlus est la réduction de la résistance à la compression du béton. D'après l'équation de Féret, le volume d'air joue un rôle important sur la résistance mécanique de la pâte de ciment hydraté, au même titre que le volume d'eau et de ciment, au regard de la résistance mécanique à la compression.

L'ouvrabilité au cours du temps a également été mesurée. Les résultats de la série 1 montrent une augmentation de la cinétique de la perte d'ouvrabilité avec le taux de substitution [GOM 12]. L'évolution de l'affaissement normalisé de la série 1 est représentée sur la Figure 2a, celle de la série à ouvrabilité constante sur la Figure 2b. On observe :

- une diminution de l'affaissement normalisé au cours du temps pour les mortiers recyclés quelque soit la méthode de formulation. Cette diminution est expliquée en partie par le fait que le sable recyclé continue à absorber une partie de l'eau au cours du temps.
- Pour des taux de substitution supérieurs à 50% l'évolution du maintien au cours du temps est identique pour

tous les mortiers quel que soit la série. Elle est modélisée par l'équation suivante :

- Pour la série 2, on remarque que la diminution du maintien au cours du temps du SR30% est moins importante que celles notées pour les compositions avec un taux de substitution > 50%.

4. PROPRIÉTÉS DES MORTIERS À L'ÉTAT DURCI

4.1. Microstructure porale

4.1.1. Porosité à l'eau

Des mesures de porosité accessible à l'eau par pesée hydrostatique ont été menées sur chaque jeu d'échantillons, selon la procédure proposée par l'AFPC – AFREM [AFPC 97]. Celles-ci ont été effectuées après conservation des échantillons dans un bain d'eau à température ambiante jusqu'à l'échéance de 28 jours. Chaque essai a été réalisé sur deux prélèvements d'environ 36 cm³ découpé au centre d'éprouvettes de dimensions 11x22 cm.

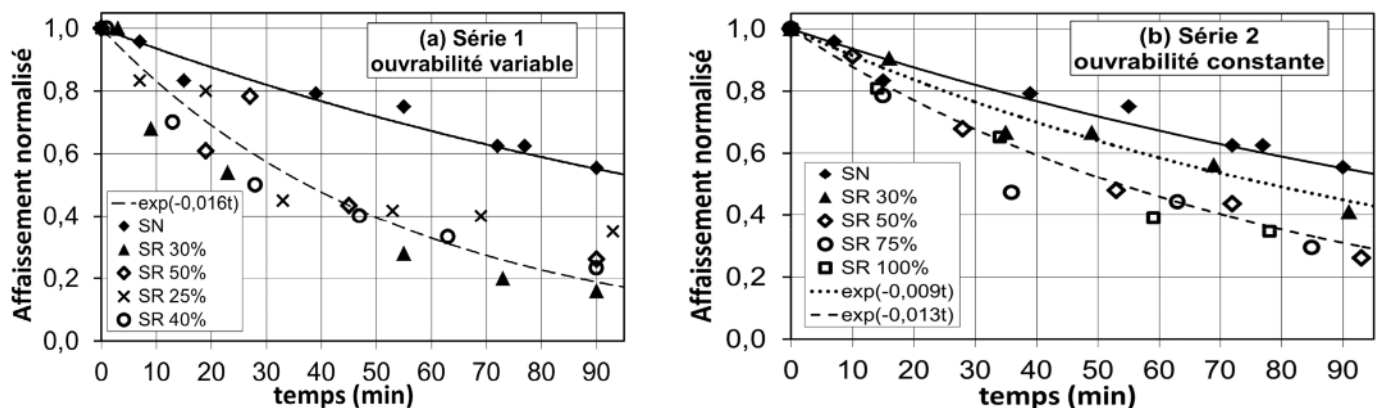


Figure 2. Évolution de l'affaissement normalisé de (a) la série 1[GOM 12] et de la (b) série 2 au cours du temps.

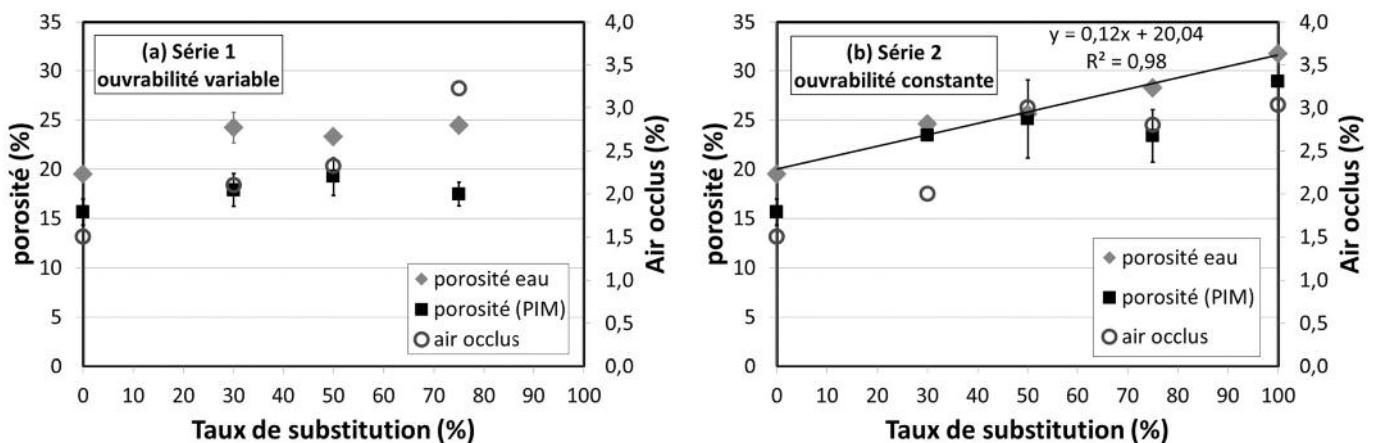


Figure 3. Porosité à l'eau, porosité par injection de mercure (PIM) et air occlus pour (a) la série 1 et (b) la série 2.

Les résultats de la porosité à l'eau sont représentés à la Figure 3. Le mortier de référence possède une porosité de 19%. Pour les mortiers à ouvrabilité variable, la porosité des mortiers recyclés augmente mais ne semble pas être affectée par le taux de substitution. Elle atteint une valeur moyenne égale à 24% (Figure 3a). Ce phénomène peut s'expliquer par la compétition entre la diminution du rapport E_{cf}/C , responsable de la diminution de la porosité [BAR 01], et par l'augmentation de la quantité de sable recyclé, capable d'absorber l'excédent d'eau responsable des espaces libres laissés dans le mortier (cf. air occlus Tableau 3). En revanche, pour la série à ouvrabilité constante, la porosité croît linéairement de 19% à 32%, pour l'échantillon SR100% (Figure 3b). Pour cette série la quantité totale d'eau introduite lors du malaxage conduit inévitablement à l'augmentation de l'air occlus et de la porosité à l'état durci.

4.1.2. Porosité mercure

Afin de compléter la description microstructurale de ces mortiers, une étude de porosimétrie par intrusion de mercure (AutoPore IV 9500 – Micromeritics) a été réalisée sur les deux séries. Chaque échantillon a été conservé dans un bain d'eau à température ambiante jusqu'à la conduite des mesures (28 jours), puis séché à l'étuve à $(75 \pm 5)^\circ\text{C}$ pendant 48 h, afin de ne pas fragiliser la matrice cimentaire. Chaque mesure est réalisée sur deux cubes d'environ 4 cm^3 , découpés au cœur des éprouvettes.

La porosité par intrusion de mercure (PIM) est également représentée sur la Figure 3. Les valeurs obtenues par la méthode PIM viennent corroborer les résultats obtenus par la porosité accessible à l'eau. En effet, l'évolution de la porosité mercure montre un comportement comparable aux résultats de la porosité à l'eau pour les séries 1 et 2, respectivement, avec toutefois une sous-estimation des valeurs ; ceci est dû au fait que la méthode PIM ne permet pas d'atteindre ni les petits pores (6 nm) ni ceux dont le diamètre est supérieur à $360\text{ }\mu\text{m}$.

La Figure 4 montre la répartition porométrique des deux séries de mortiers. La distribution porale du mortier de référence présente deux familles de pores très rapprochées, la principale étant centrée autour de 60 nm et la

seconde autour de 100 nm. Les courbes des mortiers à ouvrabilité variable (Figure 4a) montrent un comportement similaire à celui de référence jusqu'à 50% de taux de substitution. À 75%, la seconde famille de pores est centrée autour de 200 nm. Pour la série 2, les résultats montrent une microstructure très différente. En effet, dès 30%, il apparaît une famille de pores supplémentaire, cf. Figure 4b. Les diamètres des pores sont de l'ordre de 60 nm, 300 nm et $1,3\text{ }\mu\text{m}$ (pores capillaires). Le décalage et la création de la nouvelle famille de pores pour la série 2 pourraient être liés à l'augmentation de la quantité d'eau totale [VER 68].

4.2. Propriétés mécaniques

Des éprouvettes cylindriques $11 \times 22\text{ cm}$ ont été fabriquées afin de caractériser la résistance à la compression et le module d'élasticité dynamique. Ces éprouvettes ont été démoulées au bout de 24 h, puis immergées dans un bain d'eau à température ambiante, jusqu'à l'âge de 28 jours. Les éprouvettes ont été systématiquement retirées du bain 3 h avant les essais. Les essais de compression ont été réalisés à l'aide d'une presse de type Schenck à asservissement hydraulique d'une capacité de 3500 kN, assistée par ordinateur. Les essais sont réalisés à une vitesse de contrainte de $0,5\text{ MPa/s}$. Le module d'élasticité dynamique, E_d , a été déterminé à l'aide d'un appareil de mesure de la fréquence de résonance (E-Meter MK II). Chaque essai de compression et du module d'élasticité dynamique a été réalisé sur cinq éprouvettes et les résultats présentés ci-dessous correspondent à la moyenne des valeurs obtenues.

La résistance à la compression, R_c , à 28 jours en fonction du taux de substitution est reportée sur la Figure 5. La résistance R_c du mortier de référence s'élève à 48 MPa. On observe :

- Pour la série 1, une diminution de la résistance mécanique pour SR30%, ($R_c = 40\text{ MPa}$) suivie immédiatement d'un palier jusqu'à SR75%. Bien qu'on note une légère diminution pour ce dernier échantillon, les résistances restent élevées puisqu'elles représentent encore 75% de celles du mortier de référence.

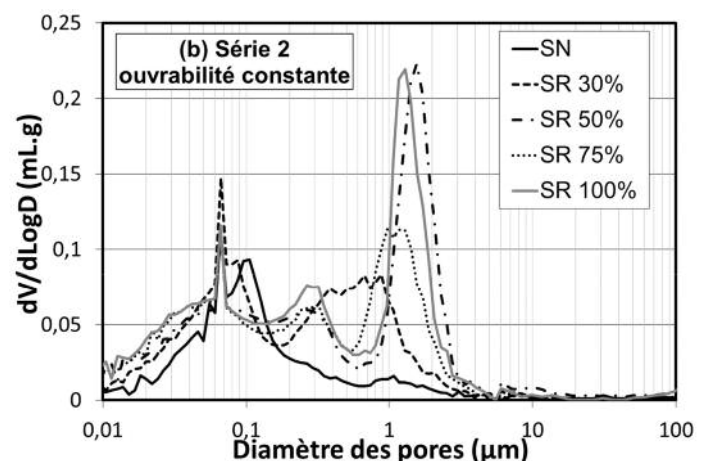
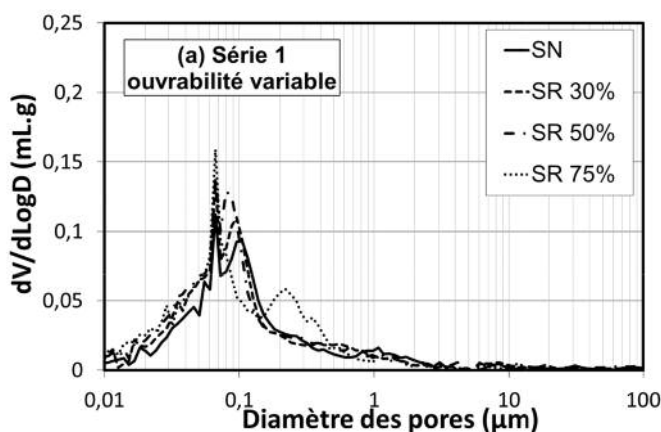


Figure 4. Distribution de la taille des pores (a) de la série 1 et (b) de la série 2.

– Pour la série 2 à ouvrabilité constante, les valeurs de R_c décroissent linéairement pour atteindre 28 MPa pour SR100%, soit 60% de la résistance du mortier de sable naturel. Pour SR75% on note que R_c vaut 65% de celle du mortier de référence.

La Figure 6 illustre l'évolution des propriétés mécaniques en fonction de la porosité à l'eau. On observe une très bonne corrélation entre la porosité et la résistance à la compression d'une part, et le module d'élasticité d'autre part. Il est à noter que dans le cas de la série 1, les points correspondant à R_c , et E_d , respectivement sont très rapprochés pour les échantillons contenant du sable recyclé, ce qui correspond au palier observé pour la porosité à l'eau (cf. Figure 3a).

5. CONCLUSIONS

Le présent travail s'intéresse à l'effet de l'utilisation du sable recyclé sur les propriétés à l'état frais et durci de

deux séries mortiers : l'une à ouvrabilité variable (série 1), l'autre à ouvrabilité constante (série 2). Les résultats de cette étude ont montré que :

1. Pour la série 2 à ouvrabilité constante, le sable recyclé joue un rôle prépondérant sur le maintien au cours du temps, puisque du fait de sa forte porosité, il continue à absorber une partie de l'eau libre.
2. Les deux séries ont des microstructures très différentes dues en partie à des rapports E/C distincts et à la structure poreuse du sable recyclé.
3. L'étude des propriétés mécaniques a permis de montrer une bonne corrélation avec l'évolution de la porosité. Dans le cas des mortiers à ouvrabilité variable R_c et E_d diminuent pour atteindre un palier dès 30% de sable recyclé, tandis que la série à ouvrabilité constante R_c et E_d décroissent linéairement.
4. A des taux de substitution élevés, ces mortiers présentent des caractéristiques mécaniques performantes. Il est donc envisageable de substituer le sable naturel par du recyclé dans des bétons de classe S4, voire des bétons auto-plaçant.

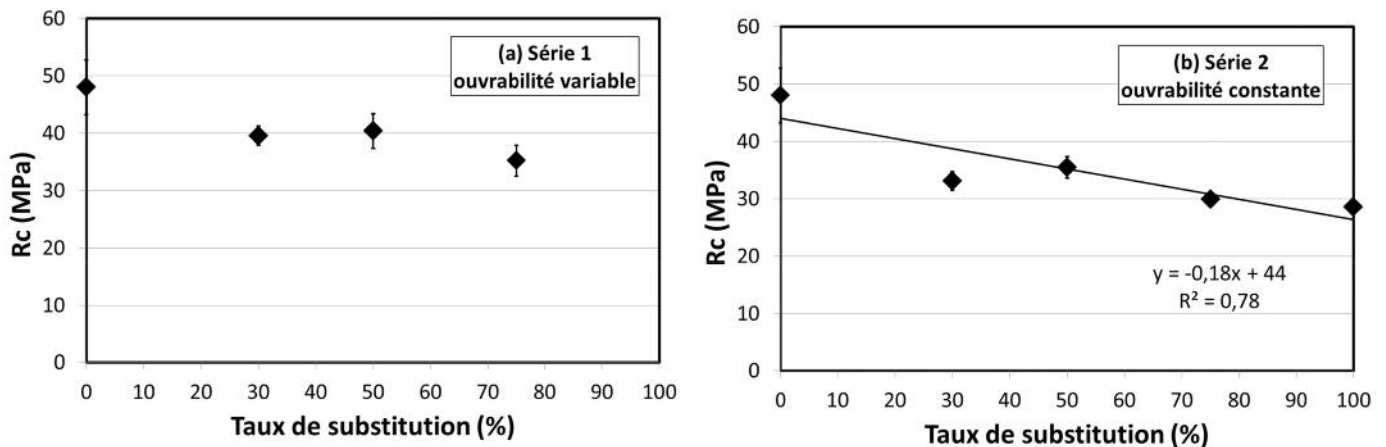


Figure 5. Évolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du taux de substitution.

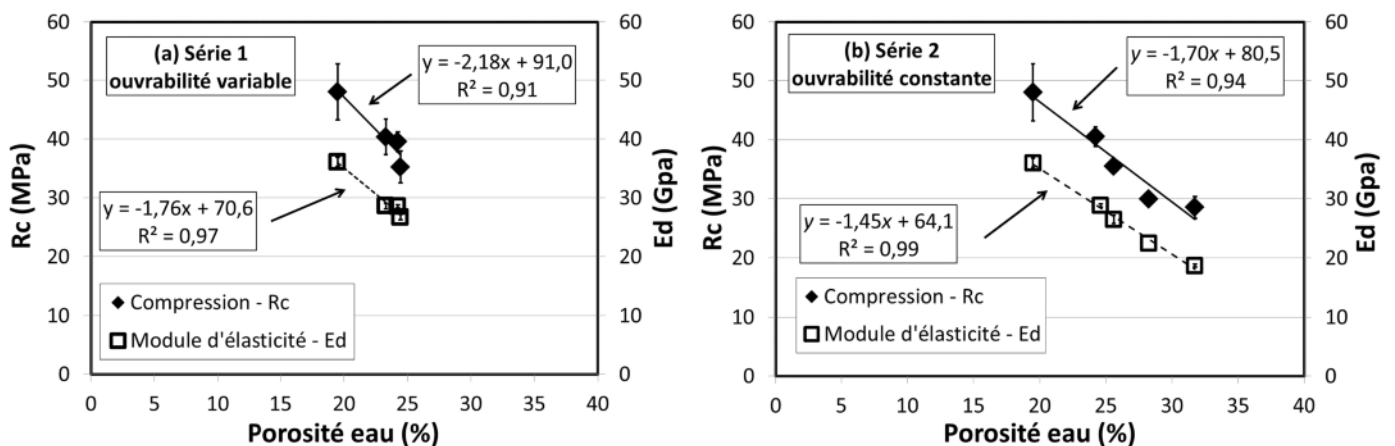


Figure 6. Évolution de la résistance à la compression et du module d'élasticité à 28 jours en fonction de la porosité.

6. BIBLIOGRAPHIE

- [AFPC 97] AFPC-AFREM, « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité », Compte rendu des Journées Techniques AFPC-AFREM : Durabilité des Bétons, Toulouse, 11-12 décembre 1997, France, p. 59-64.
- [BAR 01] BAROGHEL-BOUNY V., AMMOUCHE A., HORNAIN H., « Matrices cimentaires Analyse de la microstructure et propriétés de transfert », Revue française de génie civil, vol 5 n°2-3, 2001, p.149-177.
- [EVA 07] EVANGELISTA L., DE BRITO J. (2007), « Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates », *Cement & Concrete Composites*, vol. 29, n°5, 2007, p. 397-401.
- [GOM 12] GOMART H., GHORBEL E., WARDEH G., « Formulation et caractérisation mécanique de mortiers à base de sable de bétons recyclés », *Conférence internationale francophone Nouveaux matériaux et durabilité NoMaD 2012*, Toulouse, 19-20 novembre 2012, France, p. 386-397.
- [MOH 11] MOHAMED A.S.M., Influence de la valorisation de micro-fibres végétales sur la formation et la résistance aux cycles de gel-dégel de BAP, Thèse de doctorat, Université Cergy-Pontoise, 2011.
- [VER 68] VERBECK, G.J., HELMUTH R.H., « Structures and Physical Properties of Cement Paste », *Proceedings of the 5th International Symposium on Chemistry of Cement*, Tokyo, 7-11 octobre 1968, Japon, p. 1-32.