

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

VALORISATION DE MATÉRIAUX RECYCLÉS DANS LA CONSTRUCTION

LE Manh Tan¹, TRIBOUT Christelle¹, ESCADEILLAS Gilles¹

¹ : LMDC, Université de Toulouse, UPS, INSA, 135 Avenue de Rangueil, 31400 Toulouse.

Résumé : Il est bien connu que le béton a un impact négatif sur le plan environnemental mais il est possible de diminuer son empreinte en valorisant les déchets liés à sa fabrication et à sa mise en œuvre. Cependant, alors que de nombreuses recherches ont été conduites depuis les années 1980 sur le recyclage de bétons de déconstruction, peu de travaux portent sur la réutilisation des déchets liés au retour des bétons non utilisés sur chantier. Or, ce volume de béton résiduel retourné en centrale BPE est d'environ 4% (1% pour les centrales en zone rurale et 5% en zone urbaine). Certains de ces bétons sont actuellement coulés dans des bennes puis concassés mais seuls les gravillons sont valorisés. Il s'agit donc dans cet article de proposer une voie de valorisation pour les sables issus de ce concassage.

Les sables recyclés ont été étudiés pour remplacer le sable naturel dans les mortiers techniques (mortier de montage de blocs par exemple). Ces mortiers ne demandent pas de performances mécaniques élevées mais doivent être aussi durables que la construction dans laquelle ils sont incorporés. L'avantage des sables concassés est leur très faible teneur en eau, s'ils sont stockés à l'abri, qui permettrait de les utiliser directement dans des mortiers secs prêt-à-l'emploi. Leur teneur résiduelle en ciment anhydre pourrait améliorer leur performance, particulièrement à court terme.

Après une phase de caractérisation des sables recyclés, l'étude proprement dite sur mortier a été effectuée à l'état frais et à l'état durci, en suivant une approche performantielle, sur des sables recyclés non carbonatés (SR) ou carbonatés (SRC) en comparaison avec un mortier confectionné avec un sable naturel (SN) de mêmes caractéristiques minéralogiques.

Les maniabilités des différents mortiers sont comparables lorsque les sables sont pré-saturés. Du point de vue mécanique, les résultats sont peu affectés par la substitution de SN par du SRC alors que la substitution du SN par du SR est plus défavorable. Les effets sur les indicateurs de durabilité restent faibles (on reste dans les mêmes gammes de durabilité) et dépendent de l'indicateur.

Mots-clés : valorisation retour béton, mortier technique, approche performantielle

1. INTRODUCTION

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction. Cependant il a un impact négatif sur le plan environnemental du fait de la consommation de ressources non renouvelables (roches pour le ciment et les granulats), de la production de gaz à effet de serre pour la fabrication de ciment (0,8 tonne environ de CO₂ par tonne de clinker) et de déchets lors de sa fabrication. Pour des raisons environnementales mais aussi économiques, on cherche donc à diminuer l’empreinte environnementale des bétons en diminuant ou en valorisant au mieux les déchets à la fabrication.

Le recyclage s'impose comme une voie à privilégier, face à l'enfouissement, pour respecter entre autres l'objectif européen de valorisation de 70% des déchets inertes d'ici 2020 (“Déchets du bâtiment et des travaux publics” n.d.). Les premières recherches sur les bétons recyclés ont commencé au début des années 1980 et ont cherché à valoriser les déchets de démolition des bâtiments et autres structures en béton. Dans un premier temps les blocs de béton concassés ont été utilisés en sous-couche routière ; puis, en améliorant les phases de triage et de concassage, l’utilisation des bétons recyclés s’est élargie à la construction des bâtiments. Cependant, peu de travaux portent sur les déchets liés à la fabrication des bétons.

La plupart des bétons utilisés sur chantier sont fabriqués dans des centrales de béton-prêt-à-l’emploi (BPE) et amenés sur les chantiers par des camions toupies. Les déchets directement liés à la fabrication sont les laitances consécutives au lavage des malaxeurs et récupérées dans des bassins de décantation. En France, elles représentent annuellement 1 million de tonnes de déchets et des coûts de stockage estimés à 10 millions d’euros. Leur valorisation est envisagée en traitement de sols non présentée ici. Les déchets indirects sont liés aux « retours de chantier » et correspondent au surplus de béton commandé par le chantier et non utilisé. Il est estimé à 4% de la production (1% pour les centrales en zone rurale et 5% en zone urbaine (Vieira and Figueiredo 2016)), ce qui représente annuellement en France 1,5 millions de tonnes de retours de bétons.

La création de voies de valorisation, techniquement performantes et environnementalement acceptables, représente donc un enjeu économique et écologique majeur. C’est dans cet objectif que la société GranuLab, qui traite des déchets de béton sur la région toulousaine, cherche à améliorer la valorisation des bétons retournés. Ces bétons sont actuellement récupérés dans des bennes puis concassés industriellement mais seuls les gravillons sont valorisés. Il s’agira donc ici de valoriser les sables issus de ce concassage (partie inférieure à 4 mm), en particulier dans la fabrication de mortiers techniques.

2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

2.1 Matériaux

2.1.1 Sable naturel

Le sable naturel (SN) utilisé comme référence est un sable de rivière siliceux 0/4 roulé de Garonne, avec plus de 90% de passant au tamis de 4 mm. Ce sable est aussi celui qui a été utilisé dans la plupart des bétons à recycler. Le sable SN utilisé dans cette étude correspond donc à ce sable coupé à 4 mm, afin de pouvoir faire l’étude sur la même fraction granulométrique, et qui a été séché à l’étuve à 105°C avant utilisation. L’analyse granulométrique est donnée Figure 1, la masse volumique et le coefficient d’absorption d’eau déterminés selon la norme NF 1097-6 sont donnés dans le .

2.1.2 Sable recyclé

Le béton concassé a été prélevé dans des sacs étanches lors d’une phase industrielle de concassage de bétons à recycler. Il a été séché à 80°C puis criblé à 4 mm pour obtenir le sable recyclé (SR). La part inférieure à 4 mm représente 40% environ du béton concassé ce qui montre l’importance de la valorisation de cette coupure. Le tamisat a ensuite été remis à l’étuve à 80°C jusqu’à masse constante

(moins de 0,2% de variation entre 2 pesées consécutives) puis stocké à nouveau en sac étanche. L'analyse granulométrique est présentée Figure 1, la masse volumique et le coefficient d'absorption d'eau dans le .

Pour étudier les effets de la carbonatation du sable recyclé SR, qui peut se produire naturellement quand le sable est stocké à l'extérieur, une partie a été mise en enceinte de carbonatation accélérée (50% CO₂, 65% HR) jusqu'à carbonatation totale, vérifiée à la Phénolphtaléine. Ce sable carbonaté est appelé SRC. La masse volumique et le coefficient d'absorption d'eau sont présentés dans le .

a. Granulométrie

La Figure 1 met en évidence la teneur plus élevée du SR en éléments fins et sa teneur plus faible en éléments 0,25-2 mm en comparaison avec le SN. L'allure du SR est caractéristique des matériaux concassés et notamment des sables recyclés (Le et al. 2016) alors que celle du SN est typique des sables roulés lavés.

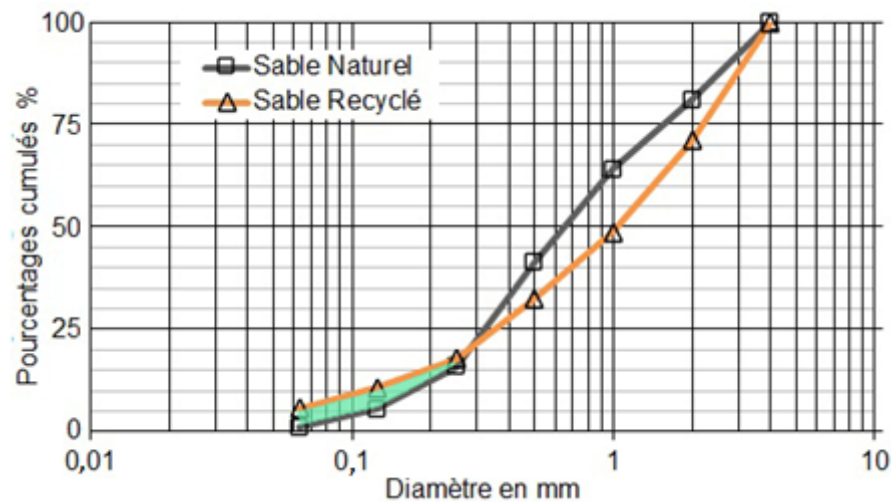


Figure 1 : Courbes granulométriques du sable naturel SN et du sable recyclé SR

b. Masse volumique et teneur en eau

	SN	SR	SRC
Masse volumique réelle (kg/m ³)	2,62 ± 0,01	2,01 ± 0,01	2,20 ± 0,05
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2,70 ± 0,01	2,68 ± 0,01	2,68 ± 0,02
Coefficient d'absorption d'eau WA (%)	1,16 ± 0,16	12,48 ± 0,36	8,12 ± 0,87

Tableau 1 : Masses volumiques et coefficient d'absorption d'eau des sables étudiés

Les masses volumiques absolues des trois sables sont équivalentes alors que les masses volumiques réelles sont différentes. L'écart entre la masse volumique absolue et la masse volumique réelle de chaque sable nous informe sur sa porosité. Ainsi, si le SN est très peu poreux, il n'en est pas de même du SRC et surtout du SR. Cette porosité supplémentaire est liée à la présence de pâte durcie dans le sable recyclé (Voir 2.1.2. c). En ce qui concerne le coefficient d'absorption d'eau WA, le SR présente le coefficient le plus élevé, le SN a le plus faible et le SRC a un coefficient intermédiaire. La diminution du

WA pour le SRC peut s'expliquer par la carbonatation du SR en présence d'humidité qui, par formation de nouveaux composés carbonatés, diminue la porosité ($\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$).

c. Observation au MEB

La Figure 2 présente les images obtenues au MEB en mode BSE et les cartographies en silicium et calcium par EDS sur deux fractions du SR : 0.063/0.25 mm et 1/4 mm.

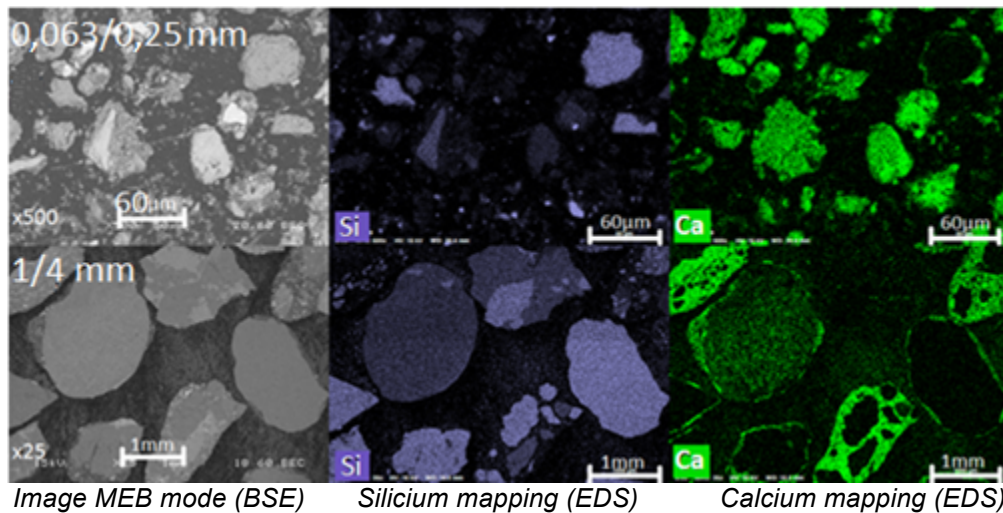


Figure 2 : Observation au MEB + EDS du SR : en haut fraction 0.063/0.25mm et en bas fraction 1/4mm

On peut se rendre compte de la teneur en ciment en regardant l'importance du calcium sur les images de la Figure 2 par rapport au silicium (le calcium est uniquement relatif aux phases cimentaires alors que le silicium est surtout relatif aux phases granulaires). On voit que la plupart des composants de la plus petite fraction renferment du calcium, alors que la fraction la plus grosse est composée de calcium entourant des phases renfermant du silicium (représentatif de phase cimentaire entourant des granulats, conformément aux travaux de Khoshkenari et al. (Khoshkenari et al. 2014)).

d. Teneur en ciment

La teneur en ciment est calculée par les méthodes des inertes et silice soluble selon les recommandations Grandubé (Hornain et Arliguie 2007). Les résultats par fraction sont présentés dans le .

Fraction (mm)	0/0,063	0,063/0,25	0,25/1	1/4
Méthode des inertes	24,8	31,0	20,7	15,6
Méthode de la silice soluble	25,4	33,0	21,8	17,4
Moyenne	25,1	32,0	21,3	16,5

Tableau 2 : Teneur en ciment du sable recyclé par fraction (%)

Ce tableau montre que la fraction la plus riche en ciment est la fraction 0.063/0.25 mm et la plus pauvre en ciment est la fraction 1/4 mm conformément aux observations MEB et analyse EDS et aux travaux de Evangelista et al. (Evangelista et al. 2015). En moyenne, la teneur en ciment du sable SR est de 21.8%.

2.1.3 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment Portland CEM I 52.5R, de densité 3,15 et de finesse Blaine 4300 cm²/g. Ses compositions chimique et minéralogique sont données dans le .

Oxides en %	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
% massique	63,99	19,89	5,64	2,47	1,77	3,13	0,4	0,07	1,73
Bogue composition	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF					
% massique	53,7	17,9	9,5	6,9					

Tableau 3 : Composition chimique et minéralogique du ciment Portland utilisé

2.1.4 Mortiers

Trois mortiers sont fabriqués : SN100, SR100, SRC100. Le SN100 est le mortier de référence, le SR100 est le mortier avec 100% de SR alors que le SRC100 est le mortier avec 100% de SRC. La formulation des trois compositions, donnée dans le , est construite sur les principes suivants :

- Une même quantité d'eau efficace ;
- Une même quantité de ciment ;
- Un remplacement volumique du sable SN par du SR ou du SRC.

Les sables à l'état sec sont pré-saturés 24 heures avant le coulage, avec une quantité d'eau correspondant à WA%, puis mis dans des sacs étanches et conservés dans une salle climatisée à 20 ± 2°C. La procédure de malaxage suit la norme EN 196-1.

Les mortiers sont mis en œuvre dans des moules 4x4x16 cm avec une table à choc selon la norme EN 196-1 pour les essais mécaniques et dans des moules en carton φ11xh22 cm par vibration sur table vibrante pour les essais de durabilité. Après le coulage, les moules sont mis dans une chambre humide à 20°C et plus de 95% HR. Le démoulage est fait un jour après le coulage et toutes les éprouvettes sont ensuite conservées dans un bassin d'eau à 20 ± 2°C.

Composition	Masse (kg)			Eau saturation (kg)	Ciment (C) (kg)	Eau efficace (E) (kg)	C/E	Densité théorique (kg/m ³)
	SN	SR	SRC					
SN100	1777,1	0,0	0,0	20,6	350	232,8	0,67	2380,5
SR100	0,0	1323,7	0,0	165,2	350	232,8	0,67	2063,6
SRC100	0,0	0,0	1448,9	117,7	350	232,8	0,67	2149,4

Tableau 4 : Composition des mortiers

2.2 Méthodes

2.2.1 Essais à l'état frais

La consistance du mortier a été déterminée selon la norme NF P 18-452 (mesure du temps d'écoulement sous vibration). La masse volumique du mortier frais a été mesurée selon la norme NF EN 12350-6.

2.2.2 Essais mécaniques à l'état durci

A chaque échéance, les éprouvettes sont sorties de la chambre humide, essuyées avec un papier absorbant et pesées avant l'essai. La résistance mécanique est mesurée à trois échéances : 2, 7 et 28 jours sur 2 éprouvettes en flexion et 4 demi-éprouvettes en compression (selon la norme EN 196-1).

2.2.3 Durabilité

Les essais de durabilité pratiqués sont les suivants :

- Porosité accessible à l'eau selon la norme NF EN 18-459 ;
- Migration des ions chlorures selon la méthode NT BUILD 492 ;
- Perméabilité à l'oxygène selon la norme NF EN 12390-2 ;
- Remontée capillaire selon la norme NF EN 772-11 ;
- Carbonatation selon la norme NF- XP P18-458 (4% de CO₂).

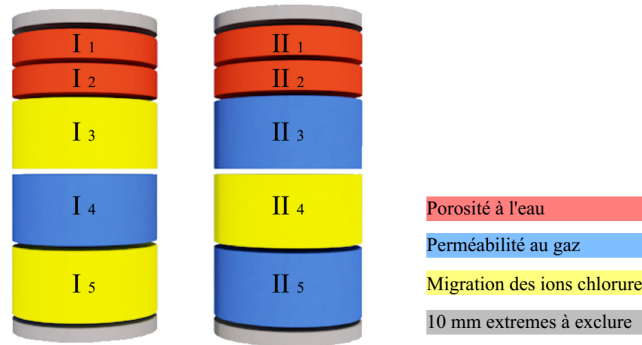


Figure 3 : Référence des éprouvettes pour les essais de durabilité

Une semaine avant les essais de durabilité, deux éprouvettes $\phi 11 \times h 22$ cm sont sciées. Les épaisseurs de chaque morceau sont 20 ± 1 - 20 ± 1 - 50 ± 1 - 50 ± 1 - 50 ± 1 mm respectivement pour les morceaux 1-2-3-4-5. Afin de s'assurer de la répétabilité des résultats, les morceaux d'éprouvettes utilisés pour les essais ont été sélectionnés comme présenté sur le Figure 3. Les morceaux d'éprouvettes utilisés pour la perméabilité au gaz à 7, 28 jours et après séchage à 105°C, sont ensuite utilisés pour les essais de remontée capillaire. Pour la carbonatation accélérée, l'essai est réalisé à 3, 7, 14 et 28 jours sur une éprouvette $4 \times 4 \times 16$ cm, prétraitée une semaine dans une étuve à 40°C, puis mise dans une enceinte de carbonatation à 4% CO₂, 65%HR, 20°C.

3. RÉSULTATS

3.1 Caractéristiques à l'état frais

Le présente les résultats des temps d'écoulement et de la masse volumique à l'état frais des différents mortiers.

Essai	SN100	SR100	SRC100
Temps d'écoulement (s)	19	8	11
Masse volumique (kg/m ³)	2380,5	2063,6	2034,2

Tableau 5 : Temps d'écoulement et masse volumique des mortiers à l'état frais

Le montre que le mortier SN100 possède le temps d'écoulement le plus important par rapport aux mortiers avec sable recyclé. Or, on aurait pu s'attendre à l'inverse car le sable naturel étant roulé il aurait dû conduire à un temps d'écoulement plus faible qu'un sable concassé. L'explication est donc à rechercher sur la teneur en eau totale des mortiers. Il est vraisemblable qu'une partie de l'eau utilisée pour la saturation des sables recyclés (ménisques d'eau entre les grains de sable) soit aussi mobilisée pour faciliter l'écoulement sous vibration.

En ce qui concerne les masses volumiques mesurées, le indique une masse volumique plus élevée pour le mortier avec sable naturel. Ceci est logique compte tenu de la différence de masse volumique des sables utilisés, les sables recyclés présentant des masses volumiques plus faibles. Si on compare les masses volumiques mesurées aux masses volumiques théoriques, on constate un écart qui pourrait s'expliquer par une plus grande teneur en air dans les mortiers fabriqués (environ 40 l/m³ alors que la teneur en air théorique avait été fixée arbitrairement à 20 l/m³).

3.2 Caractéristiques mécaniques à l'état durci



La

Figure 4 présente les résultats de la résistance mécanique en compression des compositions SN100, SR100, SRC100 à trois échéances.



Figure 4 : Résistance à la compression des mortiers

Le mortier SN100 est mécaniquement le plus performant mais l'écart avec le mortier SRC100 est faible, compte tenu des dispersions. Le mortier SR100 est celui qui présente les résistances les plus faibles à toutes les échéances. Compte tenu du constat précédent sur une maniabilité supérieure pour les mortiers avec sables recyclés, on peut penser qu'une réduction d'eau de ces mortiers, permettant de travailler à maniabilité constante, conduirait à une réduction des écarts de résistance avec le mortier témoin.

3.3 Essais de durabilité

Les résultats des essais de durabilité sont donnés dans les figures 5 à 9.

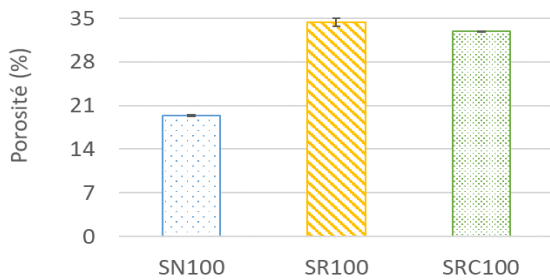


Figure 5 : Porosité accessible à l'eau

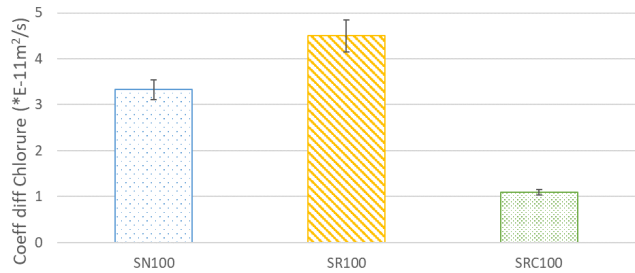


Figure 6 : Coefficient de diffusion des chlorures

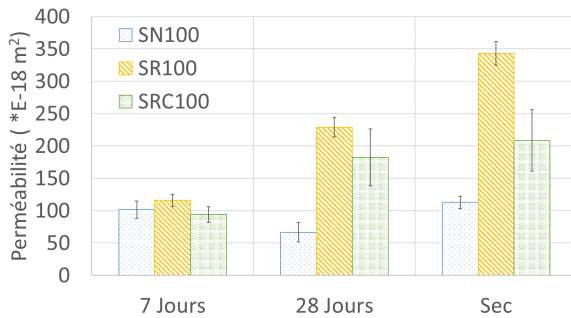


Figure 7 : Perméabilité à l'air

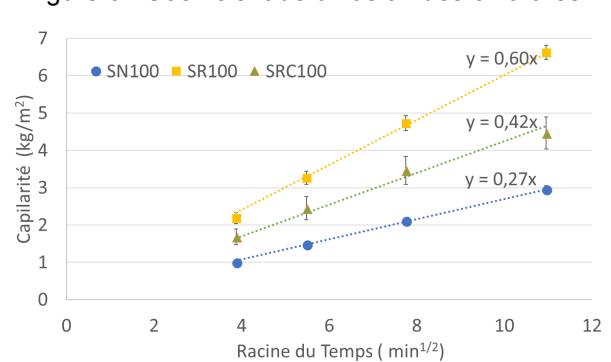


Figure 8 : Remontée capillaire

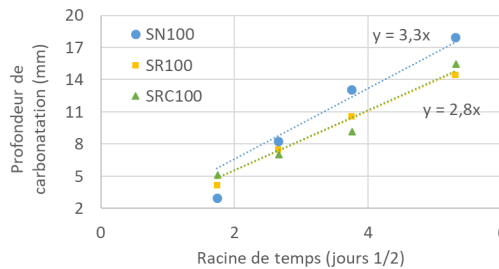


Figure 9 : Profondeur de carbonatation (enceinte 4% CO₂)

3.3.1 Porosité accessible à l'eau

Les résultats d'essai de porosité accessible à l'eau à l'état durci des différents mortiers présentés Figure 5 montrent que le mortier SR100 est celui qui présente la plus forte porosité alors que le mortier SN100 présente la plus faible. Le mortier SRC100 présente une porosité légèrement plus faible que celle du SR100. Compte tenu des paramètres de formulation fixés (pâte a priori identique), les variations de porosité peuvent s'expliquer à partir de la porosité des sables utilisés. On retrouve bien ici le fait que la porosité du sable recyclé est bien plus élevée que celle du sable naturel et que la carbonatation a conduit à une légère diminution de la porosité du sable recyclé non carbonaté. Cependant, il est possible aussi qu'une partie de la porosité supplémentaire constatée pour les mortiers de sables recyclés soit directement liée au léger excès d'eau de saturation des sables ayant conduit à des temps d'écoulement plus courts.

3.3.2 Migration des ions chlorures

Le coefficient de diffusion des chlorures des différents mortiers est présenté Figure 6. Le mortier SR100 présente le plus fort coefficient de diffusion alors que le mortier SRC100 présente le plus faible. Le mortier SN100 a un coefficient de migration intermédiaire. Le coefficient de diffusion dépend à la fois de la texture de la pâte (une augmentation de porosité se traduit par une augmentation de la migration des

ions chlorure) et de son volume (une augmentation du volume de pâte diminue le coefficient de migration en augmentant la possibilité de fixation des ions chlorure). Dans le cas du sable recyclé carbonaté, on peut supposer que l'augmentation du volume de pâte apportée par le sable arrive à compenser l'augmentation de la porosité. Par contre, cela ne semble pas être le cas pour le sable recyclé non carbonaté.

3.3.3 Perméabilité à l'oxygène

Les résultats des essais de perméabilité à l'oxygène sont présentés Figure 7, à 7, 28 jours et à l'état sec (après passage à l'étuve à 105°C). A toutes les échéances, la perméabilité du SR100 est la plus élevée alors que celle du SN100 est la plus faible (hormis à 7 jours pour laquelle les 3 mortiers sont équivalents). Ces résultats sont cohérents avec ceux de la porosité.

3.3.4 Capillarité

La Figure 8 montre l'évolution de la capillarité des trois mortiers en fonction de la racine du temps. La capillarité du mortier SR100 est la plus élevée alors que celle du SN100 est la plus faible. La capillarité du SRC100 est intermédiaire mais présente plus de dispersion. Ces résultats restent cohérents avec ceux obtenus précédemment pour la porosité accessible à l'eau et la perméabilité à l'oxygène.

3.3.5 Carbonatation

Sur la Figure 9 qui montre l'évolution de la profondeur carbonatée en fonction de la racine carrée du temps, on constate que le mortier SN100 est celui qui se carbonate le plus vite alors que les mortiers SR100 et SRC100, qui sont équivalents, se carbonatent moins vite. La carbonatation moins rapide des mortiers avec sables recyclés peut s'expliquer par une quantité de matière carbonatable supérieure du fait de la présence d'une quantité de ciment hydraté dans le sable. Le fait que cette partie de ciment est carbonatée ou pas ne semble pas essentiel : ceci peut venir du fait que pour le SRC, la carbonatation accélérée ait uniquement affecté la portlandite (transformation en calcite avec abaissement du pH visible par pulvérisation de phénolphtaléine) mais pas les C-S-H.

3.4 Bilan

Pour faire un bilan du remplacement du sable naturel par le sable recyclé, nous avons construit les indices de durabilité en faisant en sorte que lorsque l'indice est supérieur à 1, la durabilité du mortier testé est supérieure à celle du mortier témoin. Les indices retenus sont les suivants :

- Indice de résistance à la compression = $\frac{\text{Résistance à 28 jours du mortier choisi}}{\text{Résistance à 28 jours du mortier référence}}$
- Indice de coefficient de migration des ions Chlorures = $\frac{\text{Coef de migration Cl}^- \text{ du mortier référence}}{\text{Coef de migration Cl}^- \text{ du mortier choisi}}$
- Indice de porosité accessible à l'eau = $\frac{\text{Porosité du mortier référence}}{\text{Porosité du mortier choisi}}$
- Indice de capillarité de l'eau = $\frac{\text{Coef de capillarité du mortier référence}}{\text{Coef de capillarité du mortier choisi}}$
- Indice de perméabilité à l'air = $\frac{\text{Perméabilité à l'état sec du mortier référence}}{\text{Perméabilité à l'état sec du mortier choisi}}$
- Indice de carbonatation accélérée = $\frac{\text{Coef de carbonatation du mortier référence}}{\text{Coef de carbonatation du mortier choisi}}$

La Figure 10 présente l'indice de durabilité global des compositions SN100, SR100, SRC100. Le mortier référence est le mortier de composition SN100 (trait bleu) dont les indices sont fixés à 1. Les indices des autres mortiers varient selon les formulations.

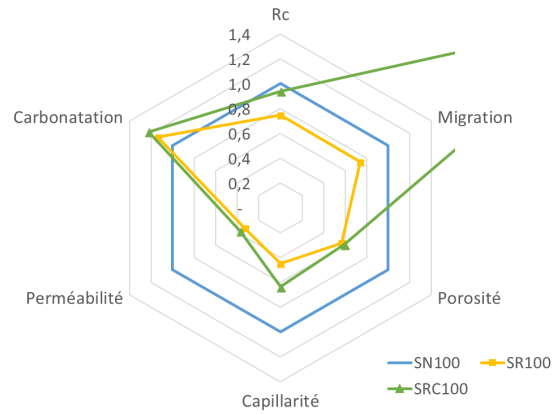


Figure 10 : Indice de durabilité des différents mortiers

La Figure 10 met tout d'abord en évidence une même gamme de durabilité pour l'ensemble des mélanges même si des différences de comportement existent entre les compositions. Par rapport au mortier de référence SN100, on observe une diminution plus ou moins importante de la durabilité pour les 2 compositions avec sable recyclé pour tous les critères sauf pour la carbonatation accélérée (pour la migration, le bilan varie selon la composition considérée). Le mélange SRC100 s'avère plus favorable sur la durabilité que ne l'est le SR100 : il est pratiquement équivalent au mélange de référence sur les résistances mécaniques, supérieur sur la migration des chlorures (un indice de 3) et la carbonatation, et inférieur sur la perméabilité à l'air, la porosité accessible à l'eau et, dans une moindre mesure, la capillarité.

4. CONCLUSIONS

Une voie de valorisation pour le sable recyclé issu du concassage des retours de béton en centrale BPE est présentée dans cette étude. Pour cela, nous avons étudié l'influence de la substitution totale de sable naturel par du sable recyclé non carbonaté ou carbonaté dans des mortiers en suivant une approche de type performantielle.

Plusieurs conclusions peuvent être tirées suite aux résultats obtenus :

1. Le sable recyclé non carbonaté (SR) est composé de sable naturel (SN) non poreux entouré de pâte de ciment durcie et poreuse (teneur en ciment estimée dans notre étude à 21.8%). La présence d'hydrates entraîne une augmentation du coefficient d'absorption et de la porosité et une diminution de la densité par rapport au sable naturel.
2. Les mortiers confectionnés avec les sables SR et SRC présaturés, à teneur en ciment et rapport Eeff/ciment constants, présentent de meilleures maniabilités que le mortier de référence.
3. Du point de vue mécanique, les résultats sont peu affectés par la substitution de SN par du SRC (-6%) alors que la substitution du SN par du SR est plus défavorable (-26%).
4. Les effets sur les indicateurs de durabilité restent faibles (mêmes gammes de durabilité) et dépendent de l'indicateur : si l'introduction de SR ou SRC augmente la perméabilité à l'eau, la capillarité et la porosité, elle diminue la carbonatation et, pour le SRC, la migration des chlorures.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de sable recyclé à la place de sable naturel dans les mortiers techniques peut être envisagée sans trop dégrader leurs propriétés de durabilité. Ils montrent aussi que la carbonatation du sable recyclé est favorable. Il conviendra toutefois d'étudier d'autres sables recyclés afin de confirmer ces conclusions. De même, il serait intéressant d'étudier l'impact environnemental de cette solution car outre l'utilisation d'un sous-produit actuellement non valorisé, elle permet de fixer du CO₂ et évite le séchage des sables utilisés dans les mortiers techniques prêt à l'emploi, le sable recyclé ayant une très faible teneur en eau après concassage.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à la société Granulab pour avoir fourni le sable recyclé utilisé et pour leur soutien financier à cette recherche.

RÉFÉRENCES

- “Déchets du bâtiment et des travaux publics.” n.d. Ministère de la Transition écologique et solidaire. Accessed May 25, 2018. /dechets-du-batiment-et-des-travaux-publics.
- Evangelista, L., M. Guedes, J. de Brito, A. C. Ferro, and M. F. Pereira. 2015. “Physical, Chemical and Mineralogical Properties of Fine Recycled Aggregates Made from Concrete Waste.” *Construction and Building Materials* 86: 178–88. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.112>.
- Hornain, Hugues, and Ginette Arliguie. 2007. *GranDuBé: grandeurs associées à la durabilité des bétons*. Presses des Ponts.
- Khoshkenari, Adel Gorjnia, Payam Shafigh, Mahmoud Moghimi, and Hilmi Bin Mahmud. 2014. “The Role of 0–2mm Fine Recycled Concrete Aggregate on the Compressive and Splitting Tensile Strengths of Recycled Concrete Aggregate Concrete.” *Materials & Design* 64 (December): 345–54. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.048>.
- Le, Thang, Sébastien Rémond, Gwenn Le Saout, and Eric Garcia-Diaz. 2016. “Fresh Behavior of Mortar Based on Recycled Sand – Influence of Moisture Condition.” *Construction and Building Materials* 106 (March): 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.071>.
- Vieira, Luiz de Brito Prado, and Antonio Domingues de Figueiredo. 2016. “Evaluation of Concrete Recycling System Efficiency for Ready-Mix Concrete Plants.” *Waste Management* 56 (October): 337–51. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.07.015>.