

INCORPORATION DE FINES DE BÉTON DE DÉMOLITION DANS LA FABRICATION DE MORTIER PAR SUBSTITUTION DU CIMENT

L. NELFIA^a, P-Y. MAHIEUX^a, Ph. TURCRY^a, Y. AMINE^b, Ouali AMIRI^b

^a LaSIE FRE-CNRS 3474, Université de La Rochelle, Pole Sciences et Technologie, Avenue Michel Crépeau,
17042 La Rochelle, France

^b Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR-CNRS 6183, Université de Nantes
(IUT de Saint Nazaire), 58 rue Michel Ange, 44600 Saint Nazaire, France

1. INTRODUCTION

Les enjeux environnementaux et économiques ont amené les acteurs publics et privés à s'associer autour d'un projet ambitieux et novateur qui consiste à réemployer 70 % en poids des déchets non dangereux de construction et de démolition (Directive européenne 2008/98/CE) à l'horizon 2020. Ce projet national intitulé RECYBETON est un défi visant non seulement à augmenter la quantité de déchets recyclés mais aussi à améliorer la qualité de ces « nouveaux » matériaux, jusqu'ici utilisés seulement en remblai notamment routier.

Chaque année, on estime à 20 millions de tonnes le volume total de déchets provenant du Bâtiment, dont 36 % de matériaux cimentaires [ADEME, 2010]. C'est une

quantité très élevée pour un coût de mise en décharge colossal alors que ces matériaux recyclables pourraient potentiellement constituer un gisement très important. Aussi, pour augmenter la recyclabilité des matériaux cimentaires, de nouvelles filières sont à explorer et aujourd'hui plusieurs voies semblent se distinguer avec, par exemple, la fabrication de ciments à base de béton de démolition directement dans le cru ou encore la conception de liants composés par substitution du ciment. Sur cette dernière thématique, l'enjeu est double puisque cette substitution viendrait de fait limiter les émissions de gaz à effet de serre de l'industrie cimentaire, estimées aujourd'hui à 1 tonne de CO₂ pour 1 tonne de ciment produit dans le monde. De surcroit, dans la littérature, il existe très peu d'études dans cette thématique.

L'objet de notre étude suit cette deuxième thématique avec une approche en amont puisque le matériau expérimenté n'est pas un déchet du BTP mais un béton issu d'une récente étude nationale (projet ANR APPLET). Ce choix s'appuie sur une volonté de travailler avec un matériau maîtrisé tant du point de vue physico-chimique que minéralogique afin de mieux appréhender l'influence des fines, obtenues par concassage de ce béton, introduites en substitution du ciment sur la réactivité, la maniabilité et les propriétés mécaniques de mortiers.

2. MATERIAUX ET METHODES EXPÉRIMENTALES

2.1. Préparation et caractérisation des fines de béton

Les fines étudiées proviennent du béton C50/60 du projet ANR Applet fabriqué en 2007 [Aït-Mokhtar et al, 2013]. Ce dernier est composé d'un ciment de type CEM I 52.5 CP2 de l'usine de Dannes, d'une cendre volante allemande et de granulats calcaire 0/4, 5/12 et 12/20 du boulonnais. Les dosages en ciment et en cendres volantes sont respectivement de 350 kg/m³ et de 80 kg/m³ avec un rapport E/C de 0,45.

Les fines de béton ont été préparées selon un processus progressif de concassage de morceaux du béton « Applet » (après écrasement par compression d'éprouvettes 11x22 cm) et d'un criblage final à 80 µm. Après ce traitement, les fines représentent 60% du matériau initial. Les 40% restant se trouvent dans la classe granulaire 0,08/0,1 mm. Le criblage à 80 µm a été fixé arbitrairement pour garantir une finesse relativement élevée de la poudre ainsi obtenue (cf section 3.1). Les fines sont nommées "CC" dans la suite. Les caractéristiques physiques ont été déterminées à travers les mesures de : la surface spécifique

Blaine, la répartition granulométrique par granulométrie laser (CILAS 1190 LD) et enfin la masse volumique absolue par la méthode du pycnomètre. Quant aux caractéristiques minéralogiques, elles ont été déterminées par des Analyses Thermo-Gravimétriques (ATG).

2.2. Mortiers à base de fines CC : composition et caractérisation

L'étude de la substitution du ciment par les fines CC a été réalisée sur des éprouvettes mortiers 4*4*16 à raison de trois taux de substitution volumique (25, 50 et 75%). Le ciment utilisé est un CEM I 52.5 N (Lafarge, La Couronne) et le sable est siliceux d'étendue granulométrique 0/4 mm. Quatre compositions de mortiers (tableau 1) ont été préparées en maintenant constant le volume de pâte à 0,46 m³. À titre de comparaison, deux compositions complémentaires à base de filler calcaire (MEAC, Erbray) ont été étudiées. À l'état frais, la consistance des mortiers a été mesurée au mini cône (h=150 mm, d=100 mm). Les éprouvettes prismatiques 4*4*16 cm ont été coulées puis démoulées à 24h et conservées dans de l'eau à 20°C pendant toutes la durée de la cure. Les résistances mécaniques des éprouvettes de mortier ont été mesurées aux échéances de 2, 7, 28 et 90 jours (tableau 1).

Parallèlement à cela, nous avons suivi le dégagement de chaleur d'hydratation des mortiers par la méthode calorimétrique semi-adiabatique Langavant [EN 196-9] pour étudier l'influence des fines CC sur la réactivité du ciment.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Caractérisation des fines CC

Les masses volumiques absolues, les surfaces spécifiques et les diamètres médians D₅₀ des matériaux étudiés sont présentées dans le tableau 2.

	CEMI	Fine CC			Filler calcaire	
		0,25	0,5	0,75	0,25	0,5
Ciment (kg/m ³)	499	374	249	125	374	249
Fines (kg/m ³)	0	99	197	296	109	217
E/C	0,6	0,8	1,2	2,4	0,8	1,21
E/L*	0,6	0,63	0,67	0,71	0,62	0,64
Aff. (cm)	6,1	8,5	8,3	8	9,6	11,5
f _{c2j} (MPa)	32,7	24,8	10,7	2,5	21,2	11,1
f _{c7j} (MPa)	38,9	32,7	14	5,7	34,7	19,8
f _{c28j} (MPa)	48,1	38,4	16,4	4,2	37,3	17
f _{c90j} (MPa)	48,6	38,7	17,3	4,6	-	-

* L : Liant (C + Fines de béton)

Tableau 1. Composition et propriétés du mortier (kg/m³)

Matériaux	$\rho_{\text{abs.}}$ (g/cm ³)	Surface spécifique (cm ² /g)	D ₅₀ (μm)
Fine CC	2,45	6200	8,8
Filler calcaire	2,72	4700	11,8
Ciment CEM I	3,19	4100	15,4

Tableau 2. Surface spécifique et masse volumique des matériaux étudiés

On note que la surface spécifique des fines CC est supérieure à celles obtenues sur le filler calcaire et le ciment CEM I. Compte tenu de ce résultat et de la simplicité de la méthode de préparation, on peut considérer que ce processus de concassage-criblage s'avère efficace pour obtenir des matériaux à finesse élevée. D'autre part les résultats des analyses par granulométrie laser confirment cette première observation puisque le D₅₀ de la fine CC est nettement plus faible que celui des deux autres matériaux. Au regard du résultat de l'analyse thermo-gravimétrique présenté sur la figure 1, on constate que la méthodologie employée n'affecte en rien la représentativité du matériau puisque la proportion massique de CaCO₃ mesurée est similaire à la proportion de granulats calcaires incorporés dans la formulation initiale du béton (environ 73%). De plus, la courbe DTG fait apparaître les pics liés à la déshydratation des C-S-H et de la Portlandite Ca(OH)₂. Sur cette dernière, la proportion mesurée tient compte du fait qu'elle

a été en partie consommée par la réaction pouzzolanique des cendres volantes présentes dans le béton. Ces premières informations se révèlent intéressantes car s'il existe des phases anhydres résiduelles dans les fines, nous avons toutes les raisons de penser que la finesse puisse être un paramètre clé dans la réactivité hydraulique des fines. Sur ce point, le modèle de Schindler [Schindler, 2004] montre que le degré d'hydratation ultime théorique "α" pour un béton avec un CV/C de 0,22 et un E/C de 0,45 est de 0,73. Autrement dit, si l'on considère que ce dernier est atteint pour notre béton âgé de 5 ans, alors nous pouvons penser que les fines préparées contiennent au moins 4% de phases anhydres résiduelles.

3.2. Influence des fines CC sur la rhéologie et la réactivité des mortiers

D'après le tableau 1, on constate que la consistance des mortiers à base de fines CC ou de filler calcaire est plus plastique comparée à celle du mortier OPC et ceci quelle que soit la substitution volumique. Au même titre que le filler calcaire, nous pensons que la substitution du ciment par la fine CC a eu pour effet d'augmenter la compacité du liant composé par un meilleur empilement des grains favorisant ainsi l'affaissement des mortiers. En effet, avec l'augmentation de la compacité, la quantité d'eau nécessaire pour remplir la porosité diminue, et l'eau en excès participe plus à la fluidification du mélange [Sedran, 1999].

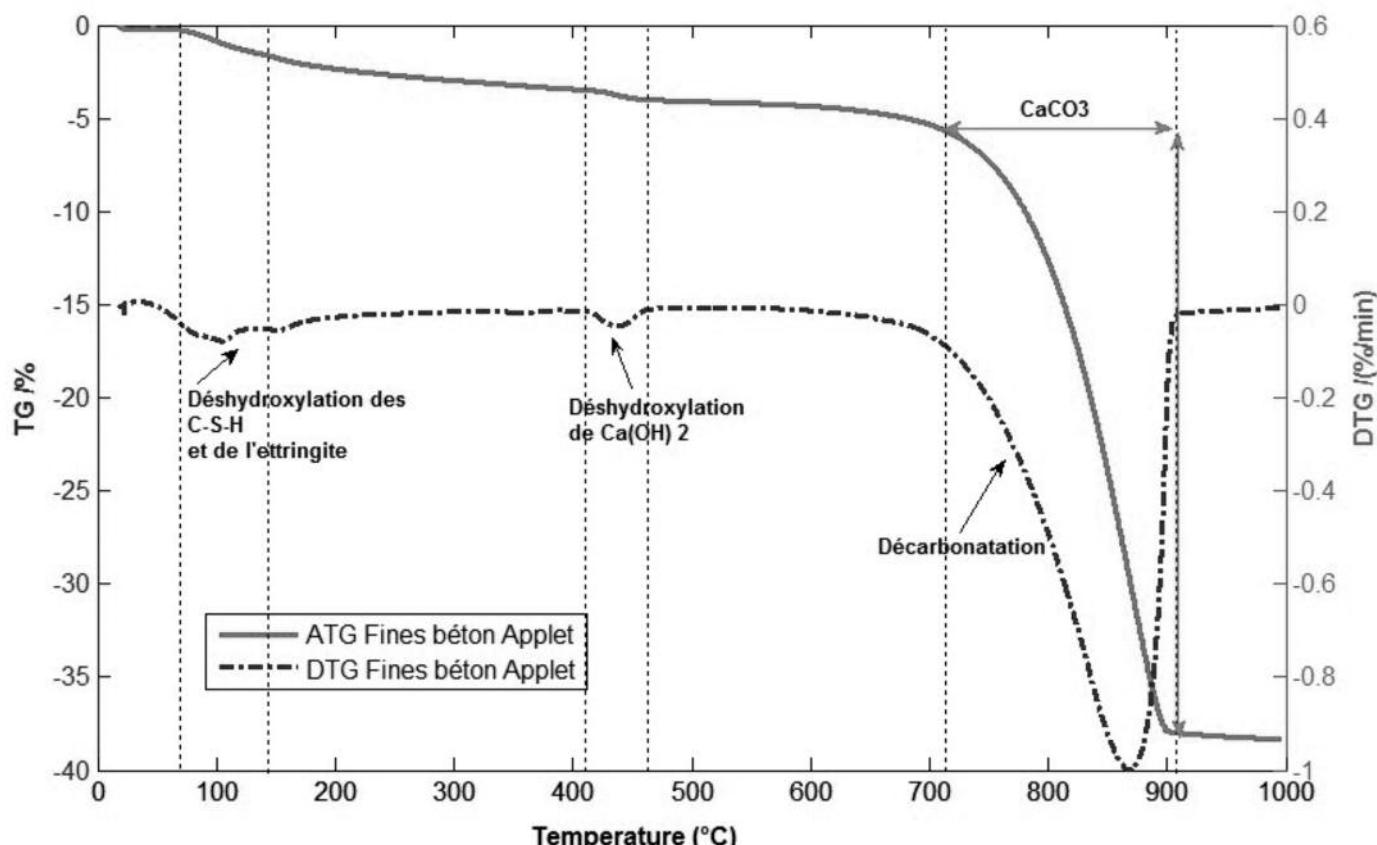


Figure 1. ATG et DTG des fines de béton CC

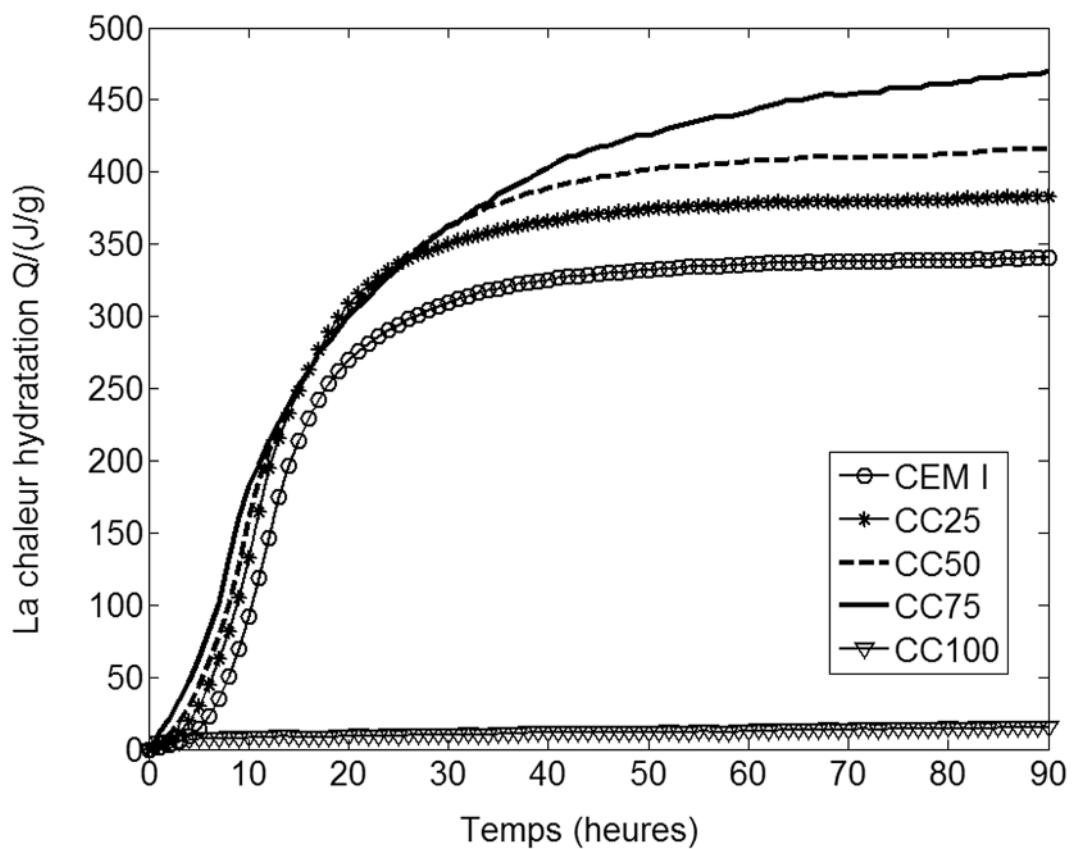


Figure 2. Evolution de la chaleur d'hydratation en fonction de l'âge et du taux de substitution des mortiers étudiés

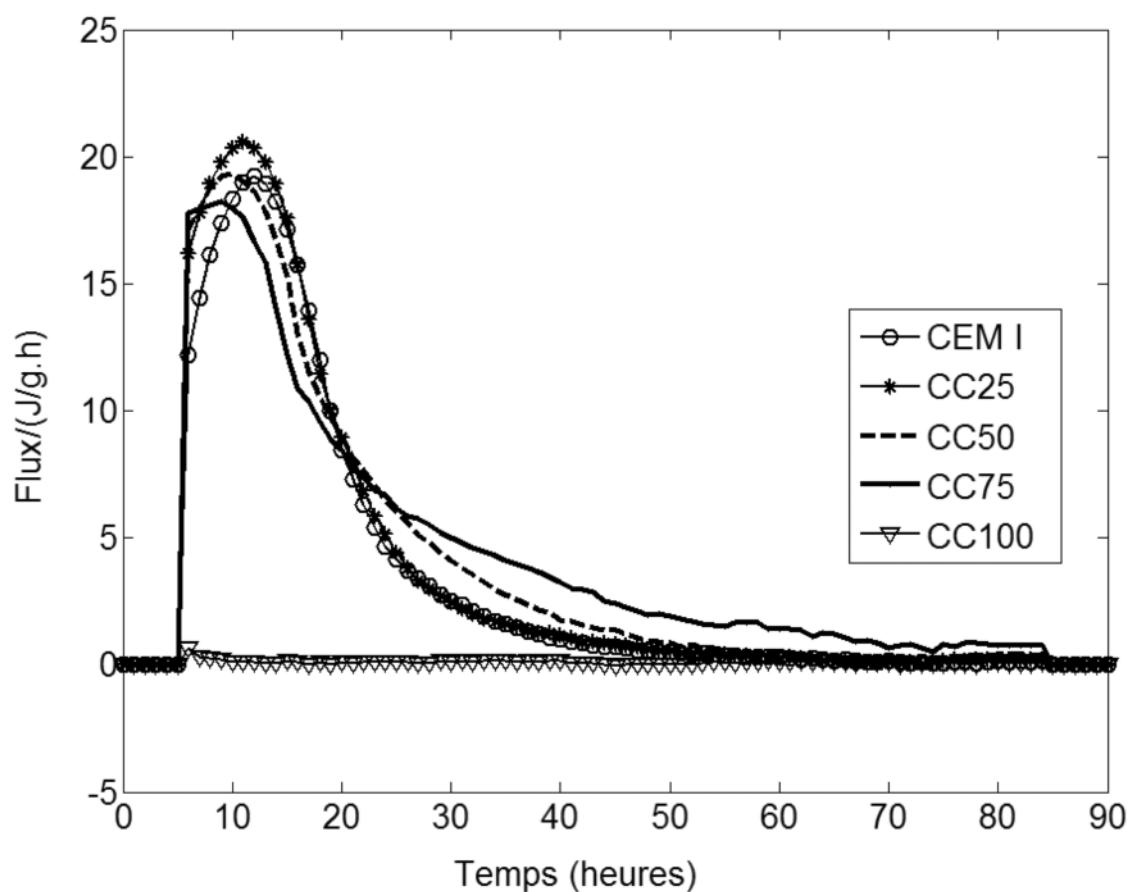


Figure 3. Flux de chaleur d'hydratation

Au-delà de la consistance, les résultats de la méthode calorimétrique montrent que les fines CC jouent aussi un rôle dans la réaction d'hydratation du ciment et ceci pour deux raisons majeures.

– La première est que l'apport de fines de béton, tout comme l'apport de filler calcaire, a pour effet d'augmenter et d'accélérer le processus d'hydratation du ciment par la création de sites de nucléation [Ye G et al., 2007]. Cet effet est très marqué puisque sur la figure 2, on constate que, plus le taux de substitution (de CC25 à CC75) est élevé, plus la quantité de chaleur dégagée à la fin de l'essai, exprimée en J/g de ciment, est élevée. De la même manière, on observe sur la figure 3 que la réaction d'hydratation est plus rapide en présence de fines CC puisque les flux de chaleur exprimés en J/g.h augmentent plus rapidement que le flux de chaleur du mortier CEM I.

– La seconde raison est que les fines de béton participent au dégagement de chaleur de par leur propre réactivité. Au regard de la courbe CC100 équivalente à un mortier dont le liant est constitué à 100% de fines, on constate que le dégagement de chaleur cumulé est proportionnel à la quantité de ciment anhydre que nous avons estimé précédemment (~ 4%).

Ces premiers résultats, montrent que la méthodologie employée pour la préparation des fines CC s'est révélée efficace pour rendre accessible à l'eau les particules de ciment anhydres résiduelles et qu'au-delà d'un effet filler bien marqué, ces fines réagissent et participent à la réactivité des mélanges.

3.3. Influence de la fine CC sur les caractéristiques mécaniques de mortiers

Sur la figure 4 sont présentées les évolutions des résistances relatives des mortiers à base de fines CC par rapport au mortier de référence OPC en fonction du temps et du taux de substitution.

Pour les fines CC comme pour le filler calcaire, on note que plus le taux de substitution est élevé plus la résistance relative est faible et ceci quelle que soit l'échéance. Cependant, pour un taux de substitution donné, les résistances relatives sont toutes plus élevées à 7 jours qu'à 28 jours. Cette observation est d'autant plus significative qu'elle confirme ce double effet d'accélération et d'augmentation de la réactivité hydraulique du ciment par les fines CC.

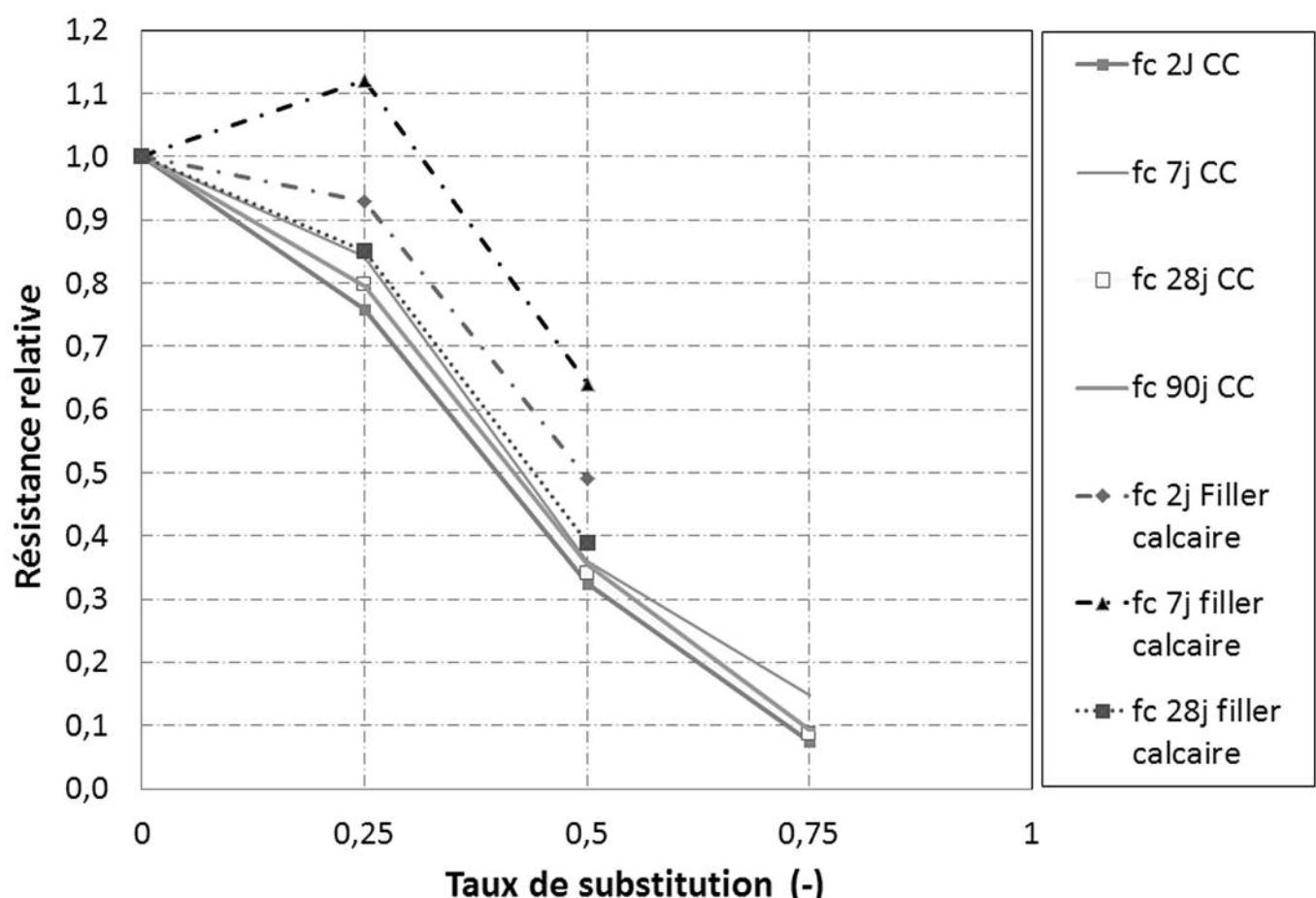


Figure 4. Influence du taux de substitution du ciment par des fines de béton et un filler calcaire sur les résistances relatives des mortiers étudiés

Quant au taux de substitution, il est évident qu'il doit être limité car la perte de performance mécanique est trop importante dès lors que l'on atteint les 50% de substitution. En revanche, si l'on se place selon les prescriptions imposées par la norme NF EN 206-1, où le taux de substitution est limité à 25 %, force est de constater que les résistances à 28 jours sont équivalentes à celles obtenues avec un filler calcaire classique. Il est donc, dans ce cas précis, tout à fait envisageable de substituer une partie du ciment par des fines de béton tout en conservant les propriétés rhéologiques et mécaniques.

D'autre part, il est possible d'évaluer l'activité χ_B des fines au sens de la relation de Bolomey [Bolomey 1935] donnée ci-dessous, selon l'approche proposée par [Khokhar, 2010].

$$f_c = K_B \left(\frac{C + \chi_B \times A}{E + V} - 0.5 \right)$$

avec : f_c est la résistance du mortier à l'âge considéré en MPa, K_B est le coefficient de Bolomey, C est la masse de ciment et E , celle de l'eau en kg/m³ de mortier, χ_B est le coefficient d'activité de l'addition, V est le volume d'air en litre par m³ de mortier et A , la masse d'additions exprimée en kg (dans notre cas, la masse de fines).

Aussi, sur la figure 5 nous présentons l'évolution de l'activité des fines CC et du filler calcaire en fonction du temps et du taux substitution.

En premier lieu, il est intéressant de noter que l'activité des fines CC est non nulle quelle que soit l'échéance et le taux de substitution. On observe même une activité supérieure pour une substitution à 75 % par rapport à celle de 50%. À titre de comparaison avec le filler calcaire, on note que l'activité est plus faible à court terme mais que cette tendance s'inverse avec le temps (χ_B équivalents à 28 jours). Ces observations corroborent bien tout ce que nous avons mis en avant précédemment à savoir que les effets de fines CC se multiplient sur les caractéristiques des mortiers à savoir : une amélioration de la compacité, une meilleure et plus rapide hydratation du ciment et enfin une hydratation résiduelle.

4. CONCLUSION

L'analyse des résultats de cette étude nous permet d'apprécier l'intérêt d'incorporer des fines obtenues par concassage / criblage de béton en tant qu'addition minérale dans la constitution d'un mortier. En effet, les fines étudiées possèdent, cinq années après le coulage du béton, un potentiel réactif non négligeable, rendu accessible par une simple

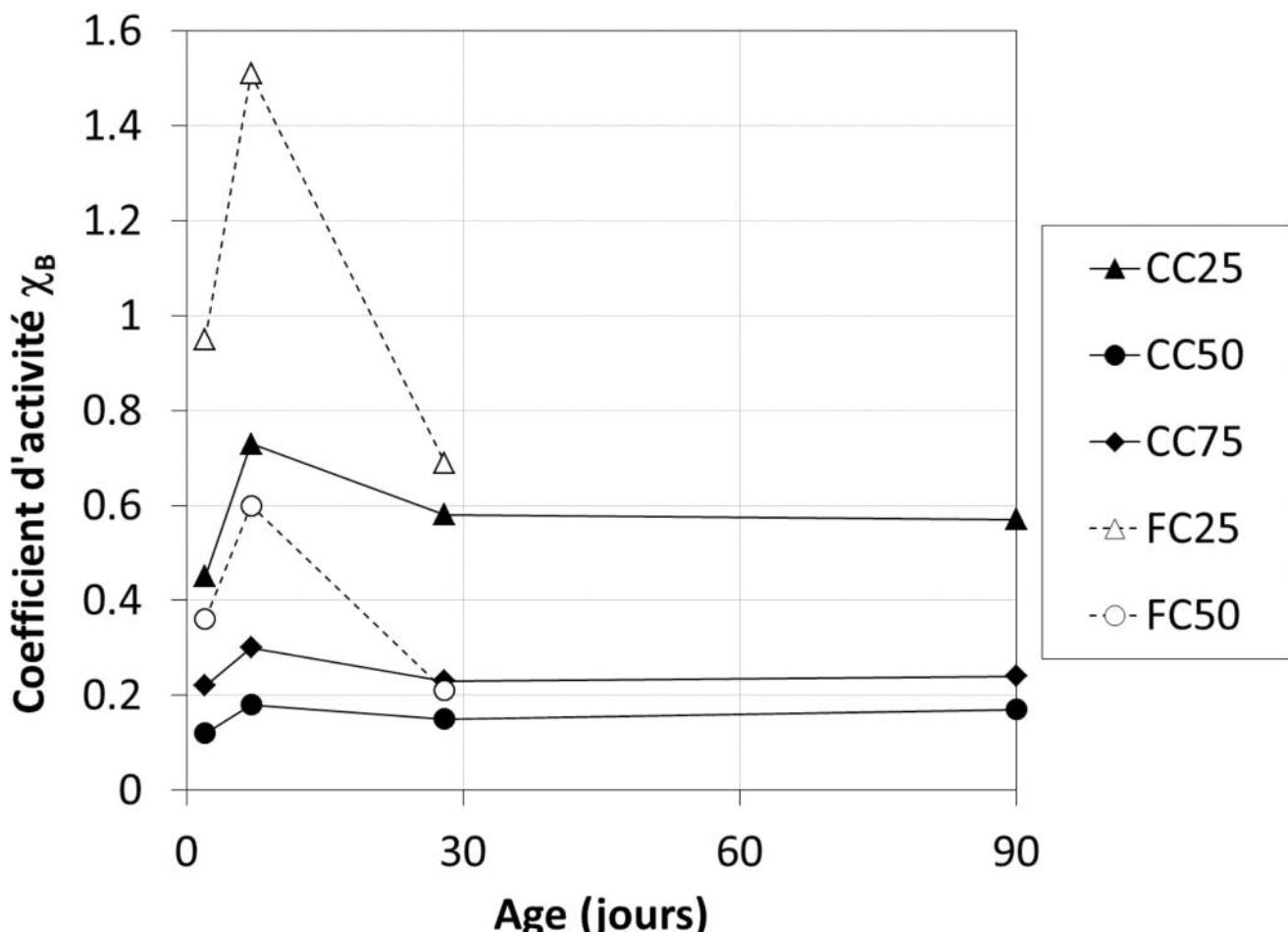


Figure 5. Coefficient d'activité selon la loi de Bolomey à différents taux de substitution de la fine CC et du filler calcaire

méthode de concassage et criblage. Par comparaison avec un filler calcaire, il semble que les fines de béton agissent de la même manière en accélérant et en augmentant la réactivité du ciment avec néanmoins des effets moins marqués à court terme. Il serait intéressant d'étudier plus en détails l'effet de la finesse sur la réactivité des fines et bien sûr d'étendre les recherches sur des bétons issus de la démolition. On peut noter que les résultats obtenus dans cette étude sont plus qu'encourageants pour le développement de nouvelles filières de valorisation des bétons de démolition.

5. RÉFÉRENCES

- [Aït-Mokhtar et al, 2013] A. Aït-Mokhtar, et al., Experimental investigation of the variability of concrete durability properties, *Cement and concrete research* 45 (2013) 21-36.
- [ADEME, 2010], Analyse technico-économique de 39 plate-formes françaises de tri/valorisation des déchets du BTP, (septembre 2010).
- [Bolomey, 1935] J. Bolomey, Granulation et prévision de la résistance probable des bétons, *Travaux*, 19 (30), 1935, 228-232.
- [CGDD 2010] Commissariat Général au Développement Durable, 254 millions de tonnes de déchets produits par l'activité construction en France en 2008, Chiffres et Statistiques n° 164, octobre 2010.
- [EN 206, 2004] NF EN 206-1, Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité (Avril 2004).
- [EN 196-9, 2003] NF EN 196-9, Méthodes d'essais des ciments partie 9 : chaleur d'hydratation – Méthode semi-adia-batique (2003).
- [Khokhar, 2010] M.I.A. Khokhar, E. Rozière, Ph. Turcry, F. Grondin, A. Loukili, Mix design of concrete with high content of mineral additions: optimisation to improve early age strength, *Cement and Concrete Composites* 32 (5) (2010) 377–385.
- [Schindler, 2004] A.K. Schindler, Effect of Temperature on Hydration of Cementitious Materials, *ACI Materials Journal*, 101 (1), 2004, 72-81.
- [Sedran, 1999] T. Sedran, Rhéologie et rhéomètre des bétons. Application aux bétons autonivelants, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1999.
- [Ye G et al., 2007] Ye G, Lieux X, Poppe A-M, Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes, *Cement & concrete composites* 29 (2007) 94-102.