

Neuvième édition des Journées scientifiques  
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton  
(RF)<sup>2</sup>B

---

Lausanne, Suisse  
28-29 août 2008

## DURABILITÉ DE BÉTONS ADDITIONNÉS DE FILLERS CALCAIRES

J. Piérard<sup>A</sup>, F. Michel<sup>B</sup>, L. Courard<sup>B</sup>

<sup>A</sup> Laboratoire de Technologie du Béton, Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC), Limelette, Belgique.

<sup>B</sup> Laboratoire des Matériaux de Construction, Université de Liège (ULg), Liège, Belgique.

**RÉSUMÉ** : La norme européenne EN 206-1 intègre le concept du coefficient k qui permet de prendre en compte les additions à caractère hydraulique ou pouzzolanique pour le respect des exigences liées à la formulation des bétons pour l'environnement choisi. Certains documents d'application nationaux étendent ce concept à d'autres types d'additions minérales telles que les fillers calcaires. En Belgique, ce principe n'est pas encore d'application.

Dans le cadre de l'étude en cours, des fillers calcaires issus de différents secteurs d'activité en Région wallonne (production de granulats, de chaux ou de pierres ornementales) ont été sélectionnés. Leur influence sur la consistance, les propriétés mécaniques et le comportement à long terme du béton (porosité à l'eau, retrait de séchage, résistance à la carbonatation et aux sulfates) a été évaluée.

### 1. INTRODUCTION

Les additions minérales sont de plus en plus souvent utilisées par les producteurs de bétons. Puisqu'il s'agit généralement de sous-produits industriels, leur prise en compte dans la formulation des bétons pour le respect du dosage minimum en ciment revêt un intérêt particulier sur le plan économique (réduction du coût des matières premières) et écologique (réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et de la consommation de ressources non renouvelables). Cette prise en compte est autorisée par la norme européenne EN 206-1:2000 pour certaines additions à caractère pouzzolanique et/ou hydraulique latent (type II) par l'intermédiaire d'un coefficient k affecté à l'addition. Les exigences normatives qui imposent, en fonction du lieu d'utilisation, un rapport eau/ciment maximum et un dosage en ciment minimum sont dans ce cas remplacées en considérant un rapport « eau/liant équivalent » maximum et un dosage en liant équivalent minimum. Le liant équivalent ( $L_{eq}$ ) est alors défini comme la somme d'une quantité de ciment (C) et d'une quantité d'addition (A) pondérée de son coefficient k ( $L_{eq}=C+k.A$ ).

En Belgique, les fillers calcaires sont encore considérés comme parfaitement inertes au sens des normes « béton ». Pourtant, de nombreuses études ont montré qu'une certaine activité « liante » pouvait leur être attribuée. C'est ainsi que certains documents d'application nationaux étendent le concept du coefficient k à des additions minérales de type I. C'est le cas notamment de la norme française NF EN 206-1 qui attribue un coefficient k de 0,25 aux fillers calcaires conformes à la norme NF P 18-508 et qui présentent un indice d'activité à 28 jours supérieur à 0,71.

Dans ce contexte, une étude est menée en Région wallonne (Sud de la Belgique) afin d'évaluer l'effet de l'application du coefficient k à différents fillers calcaires de production locale. Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet FILLTECH, mené conjointement par l'Université de Liège (ULg), le Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC) et le Centre international de la Terre et de la Pierre (CTP), et dont l'objectif est d'accroître l'emploi des fillers calcaires dans les bétons. Ce document présente les résultats de la recherche relatifs aux aspects de durabilité à long terme.

## 2. MATÉRIAUX DE L'ÉTUDE

La première partie du projet fut consacrée au recensement et à la collecte des fillers calcaires disponibles en Région wallonne. Au total, dix-sept fillers ont été caractérisés, ce qui a conduit à la sélection de six fillers calcaires (F<sub>1</sub> à F<sub>6</sub>) représentatifs de la production locale. Il s'agit pour la plupart de sous-produits générés lors de l'exploitation de roches calcaires en carrière pour la production de granulats, de chaux ou de pierres ornementales. Selon la filière d'exploitation et le procédé industriel utilisé lors de leur production (Tableau 1), les échantillons ont été récupérés à l'état sec ou à l'état humide (sous forme de boue). Dans la perspective d'un transfert en centrale à béton où les additions minérales sont plus facilement stockées à sec en trémie, les échantillons récupérés en voie humide ont subi un traitement préalable. Ce traitement consiste à sécher la matière et à la désagglomérer en une seule étape à l'aide d'un broyeur-sécheur. Il a été démontré que ce procédé permettait de conserver la granulométrie initiale du matériau (Meerseman et al., 2006).

Tableau 1. Procédés de production et secteurs d'activités dont sont issus les fillers calcaires étudiés.

Filler calcaire	Procédé de production		Secteur d'activité
F <sub>1</sub>	Procédé en voie sèche	Criblage	Chaux
F <sub>2</sub>		Séchage / criblage	Granulats
F <sub>3</sub>			
F <sub>4</sub>	Procédé en voie humide	Sciage / polissage	Pierres ornementales
F <sub>5</sub>		Lavage	Granulats
F <sub>6</sub>			

Tableau 2. Principales caractéristiques physico-chimiques des fillers calcaires étudiés.

	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>6</sub>
<i>Caractérisation minéralogique par DRX (phases principales)</i>						
Calcite CaCO <sub>3</sub> [%]	99,5	99,5	82,0	94,5	86,0	75,0
Quartz SiO <sub>2</sub> [%]	0,0	0,0	<u>15,5</u>	1,8	6,5	2,0
Dolomite CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> [%]	0,5	0,5	2,5	3,7	7,5	<u>23,0</u>
<i>Caractérisation chimique (composants mineurs)</i>						
Sulfates (SO <sub>3</sub> ) [%]	0,08	0,02	<u>0,46</u>	0,18	<u>0,64</u>	0,09
Soufre total (S) [%]	0,02	0,01	<u>0,65</u>	0,15	<u>0,44</u>	0,18
Adsorption du bleu de méthylène [g/kg filler]	0,7	0,7	<u>4,0</u>	1,3	<u>5,0</u>	<u>3,3</u>
<i>Caractérisation physique</i>						
d <sub>10</sub> [µm]	1,5	1,2	1,2	1,2	1,4	1,7
d <sub>50</sub> [µm]	13,6	9,4	8,8	<u>7,1</u>	9,0	14,8
d <sub>90</sub> [µm]	72,0	69,2	50,6	46,5	48,6	103,3
S <sub>S,BET</sub> [m <sup>2</sup> /g]	1,3	1,2	5,5	4,0	5,7	3,7

A partir de l'analyse physico-chimique présentée au Tableau 2, on observe que les fillers riches en calcite  $\text{CaCO}_3$  proviennent de l'industrie de la chaux (fillers  $F_1$  et  $F_2$ ) et de l'usinage de roches ornementales (filler  $F_4$ , caractérisé par une plus grande finesse). Les fillers de pureté moindre résultent quant à eux de l'exploitation de granulats ( $F_3$ ,  $F_5$  et  $F_6$ ). Comme en témoignent les valeurs d'adsorption au bleu de méthylène, les fillers les moins purs présentent une fraction argileuse active. La présence de ces particules d'argile tend à augmenter considérablement la surface totale développée par ces matériaux et explique les surfaces spécifiques importantes mesurées par adsorption d'azote  $S_{S,BET}$  (Michel et al., 2007). On notera également que la présence d'argile n'est pas réellement ressentie dans les valeurs de diamètre percentile  $d_{10}$ . L'échantillon  $F_4$  est un cas particulier ; sa valeur au bleu relativement élevée est principalement causée par la présence de matières organiques mise en évidence grâce à un essai à l'eau oxygénée combiné à un essai de perte au feu.

### 3. PARAMÈTRES D'ÉTUDE ET FORMULATION DES BÉTONS

Les bétons sont formulés sur base des exigences de durabilité des normes belges NBN EN 206-1:2001 et NBN B15-001:2004 pour la classe environnementale EE3 (gel et contact avec la pluie). Ces exigences imposent, dans le cas d'un béton armé ou précontraint, une teneur en liant équivalent  $L_{eq}$  supérieure ou égale à 320 kg par  $m^3$  de béton et un rapport massique eau/ $L_{eq}$  inférieur ou égal à 0,50. Le rapport  $A/(A+C)$  est fixé à 0,25, ce qui correspond au dosage maximum autorisé par la norme française NF EN 206-1. Le mélange granulaire est composé de deux sables de rivière (0/2 et 0/5 mm) et de granulats calcaires concassés dont le diamètre maximal est de 20 mm. Un superplastifiant à base de polycarboxylate est ajouté au mélange afin d'obtenir une consistance de classe S2, soit un affaissement au cône d'Abrams compris entre 50 et 90 mm.

Les compositions des bétons sont reprises au Tableau 3. On peut y constater que l'introduction de filler calcaire dans la formulation des bétons entraîne une augmentation importante de la quantité de pâte, comparé au béton de référence ( $B_{ref}$ ). Par contre, l'accroissement progressif de la valeur du coefficient  $k$  conduit à une réduction des teneurs en ciment et en addition du béton. Lorsque la valeur du coefficient  $k$  associé au filler calcaire est de 0,35, la teneur en ciment est réduite de plus de 30  $kg/m^3$  par rapport au béton de référence. Le rapport eau/ciment (E/C) s'en trouve inévitablement augmenté.

Tableau 3. Compositions des bétons étudiés.

	<b>B<sub>ref</sub></b>	<b>B<sub>15</sub></b>	<b>B<sub>25</sub></b>	<b>B<sub>35</sub></b>
Sable roulé 0/2 mm [ $kg/m^3$ ]	192	183	185	186
Sable roulé 0/5 mm [ $kg/m^3$ ]	538	513	517	519
Granulats calcaires 4/20 mm [ $kg/m^3$ ]	1187	1131	1140	1146
Ciment (C) [ $kg/m^3$ ]	320	305	295	287
Filler calcaire (A) [ $kg/m^3$ ]	---	102	99	96
Eau (E) [ $kg/m^3$ ]	160	160	160	160
Coefficient $k$	---	<b>0,15</b>	<b>0,25</b>	<b>0,35</b>
$C+k.A$ [ $kg/m^3$ ]	320	320	320	320
$C+A$ [ $kg/m^3$ ]	320	407	394	383
$A/(A+C)$	0,25	0,25	0,25	0,25
$E/(C+k.A)$	0,50	0,50	0,50	0,50
E/C	0,50	0,52	0,54	0,56

Les paramètres d'étude sont :

- Le type de ciment : un ciment Portland ordinaire CEM I 42,5 R HES (C<sub>1</sub>) et un ciment au laitier de haut fourneau CEM III/A 42,5 N LA (C<sub>2</sub>) ;
- Le type de filler calcaire, choisi parmi les six fillers (F<sub>1</sub> à F<sub>6</sub>) sélectionnés lors de la première phase de l'étude ;
- La valeur du coefficient k associé au filler calcaire (k = 0,15 pour B<sub>15</sub> ; k = 0,25 pour B<sub>25</sub> et k = 0,35 pour B<sub>35</sub>) ;
- La cure des échantillons à partir du démoulage à 24 heures, et pour une durée de 55 jours : soit une cure en chambre humide à 20 ± 2°C et plus de 95% d'humidité relative (HR), soit une cure en chambre climatique à 20 ± 2°C et 60 ± 5% HR.

#### 4. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES ET RESULTATS OBTENUS

##### 4.1 Principaux résultats de la campagne d'essais

Les tableaux ci-après synthétisent les principaux résultats de la campagne d'essais. Il s'agit des valeurs moyennes obtenues avec les échantillons de bétons à base des ciments de type CEM I (tableau 4) et CEM III/A (tableau 5), et ayant subi la cure humide dès le démoulage. Les résultats obtenus pour chaque méthode d'essai sont détaillés aux paragraphes suivants.

Tableau 4. Principaux résultats des bétons à base de ciment CEM I, additionnés ou non de filler calcaire (coefficients k de 0,15, 0,25 et 0,35).

	Dosage SP [% poids ciment]	R <sub>c</sub> à 28 jours [N/mm <sup>2</sup> ]	Abs. par immersion [% masse sèche]	Coeff. de sorption S [kg/(m <sup>2</sup> .h <sup>0,5</sup> )]	Retrait après 6 mois [μm/m]	Prof. de carbonatation après 91 jours [mm]
B <sub>ref</sub>	0,50	52,4	4,7	0,080	455	9,5
B <sub>15</sub> F <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	0,23	49,5	4,7	0,101	<u>405</u>	10,1
B <sub>15</sub> F <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	0,33	49,6	4,5	0,081	<u>396</u>	8,7
B <sub>15</sub> F <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	<u>0,69</u>	52,5	5,0	0,085	446	8,8
B <sub>15</sub> F <sub>4</sub> C <sub>1</sub>	0,49	48,6	4,8	0,094	451	11,3
B <sub>15</sub> F <sub>5</sub> C <sub>1</sub>	<u>1,15</u>	52,2	4,5	0,095	433	10,1
B <sub>15</sub> F <sub>6</sub> C <sub>1</sub>	<u>0,79</u>	49,8	4,8	0,089	473	8,8
B <sub>25</sub> F <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	0,49	46,6	4,7	0,121	<u>410</u>	9,6
B <sub>25</sub> F <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	0,34	48,9	4,8	0,107	<u>375</u>	8,6
B <sub>25</sub> F <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	<u>0,76</u>	49,7	4,9	0,087	434	9,6
B <sub>25</sub> F <sub>4</sub> C <sub>1</sub>	0,51	49,2	4,8	0,102	440	10,0
B <sub>25</sub> F <sub>5</sub> C <sub>1</sub>	<u>1,19</u>	49,8	4,7	0,119	433	10,1
B <sub>25</sub> F <sub>6</sub> C <sub>1</sub>	<u>0,81</u>	49,6	4,9	0,094	458	8,5
B <sub>35</sub> F <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	0,49	45,6	4,8	0,140	<u>386</u>	10,6
B <sub>35</sub> F <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	0,31	45,6	4,8	0,097	<u>369</u>	9,9
B <sub>35</sub> F <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	<u>0,76</u>	48,4	5,1	0,078	434	10,0
B <sub>35</sub> F <sub>4</sub> C <sub>1</sub>	0,52	48,0	5,0	0,112	420	11,0
B <sub>35</sub> F <sub>5</sub> C <sub>1</sub>	<u>1,07</u>	48,3	4,7	0,096	449	11,0
B <sub>35</sub> F <sub>6</sub> C <sub>1</sub>	<u>0,84</u>	43,8	5,1	0,101	473	9,3

Tableau 5. Principaux résultats des bétons à base de ciment CEM III/A, additionnés ou non de filler calcaire (coefficient k de 0,15).

	Dosage SP [% poids ciment]	R <sub>c</sub> à 28 jours [N/mm <sup>2</sup> ]	Abs. par immersion [% masse sèche]	Coeff. de sorption S [kg/(m <sup>2</sup> .h <sup>0,5</sup> )]	Retrait après 6 mois [μm/m]	Prof. de carbonatation après 91 jours [mm]
B <sub>ref</sub>	0,24	53,6	5,0	0,098	385	11,1
B <sub>15</sub> F <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	0,26	50,1	5,3	0,144	433	11,4
B <sub>15</sub> F <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	0,16	49,9	5,3	0,154	385	10,1
B <sub>15</sub> F <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	0,36	48,9	<u>5,9</u>	<u>0,222</u>	<u>489</u>	11,1
B <sub>15</sub> F <sub>4</sub> C <sub>2</sub>	0,49	52,5	5,0	0,131	354	9,6
B <sub>15</sub> F <sub>5</sub> C <sub>2</sub>	<u>0,98</u>	53,3	4,8	0,164	404	9,1
B <sub>15</sub> F <sub>6</sub> C <sub>2</sub>	0,46	49,8	5,2	0,155	405	10,8

#### 4.2 Consistance du béton frais

Les dosages en superplastifiant (SP) nécessaires à l'obtention de la classe de consistance S2 sont plus importants lorsque les fillers F<sub>3</sub>, F<sub>5</sub> et F<sub>6</sub> sont employés, ce qui résulte de leur contenu en particules argileuses actives, responsables de la mobilisation d'une partie de l'eau de gâchage destinée à la lubrification (Unikowsky, 1982). Ceci est illustré à la Figure 1 pour les bétons à base de ciment CEM I formulés en tenant compte d'un coefficient k de 0,25. Les valeurs d'affaissement au cône d'Abrams sont comprises entre 70 et 90 mm pour ces bétons. L'argile est quantifiée ici par l'essai d'adsorption du bleu de méthylène (valeur au bleu). L'influence de la présence d'argile sur la demande en eau des fillers et la consistance de mortiers avait déjà été mise en évidence lors de la première phase du projet (Michel et al., 2007).

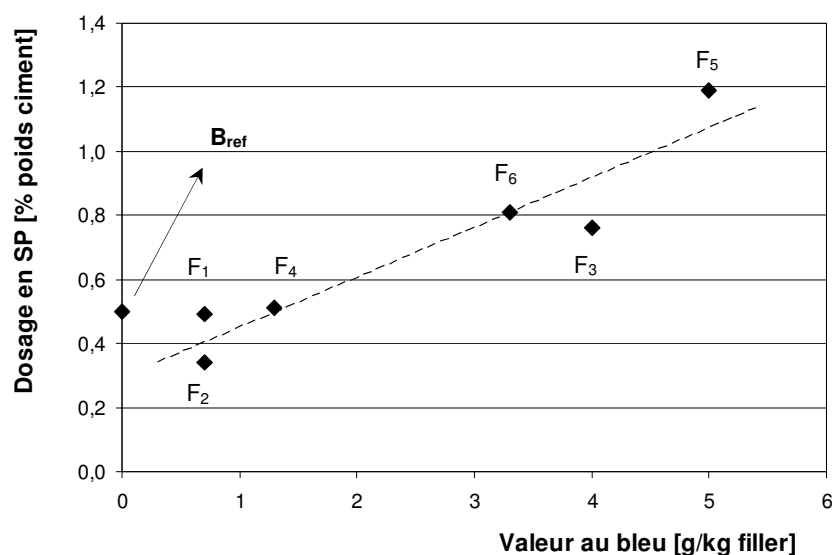


Figure 1. Influence de la teneur en argile des fillers sur le dosage en superplastifiant (bétons B<sub>25</sub>F<sub>x</sub>C<sub>1</sub>).

### 4.3 Résistance en compression

La résistance en compression  $R_c$  des bétons est déterminée sur trois cubes de dimensions  $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$  selon la norme NBN EN 12390-3:2002. Les échantillons sont démoulés 24 heures après leur confection et conservés à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et HR > 95% jusqu'à la date d'essai.

La Figure 2 illustre l'évolution de la résistance des bétons formulés avec le filler  $F_1$  et le ciment de type CEM I. L'incorporation de filler entraîne une légère diminution de la résistance en compression des bétons qui, pour un coefficient  $k$  croissant, est attribuée à la diminution de la quantité de ciment et l'augmentation du rapport E/C des bétons additionnés. Avec le filler  $F_1$ , les pertes de résistances à 91 jours sont de 8%, 9% et 12% pour des coefficients  $k$  de respectivement 0,15, 0,25 et 0,35. D'autres valeurs sont données aux tableaux 4 et 5 pour les bétons âgés de 28 jours. Dans chaque cas, les pertes de résistance restent suffisamment faibles pour que la classe de résistance minimale (C30/37) associée à la classe environnementale EE3 soit respectée.

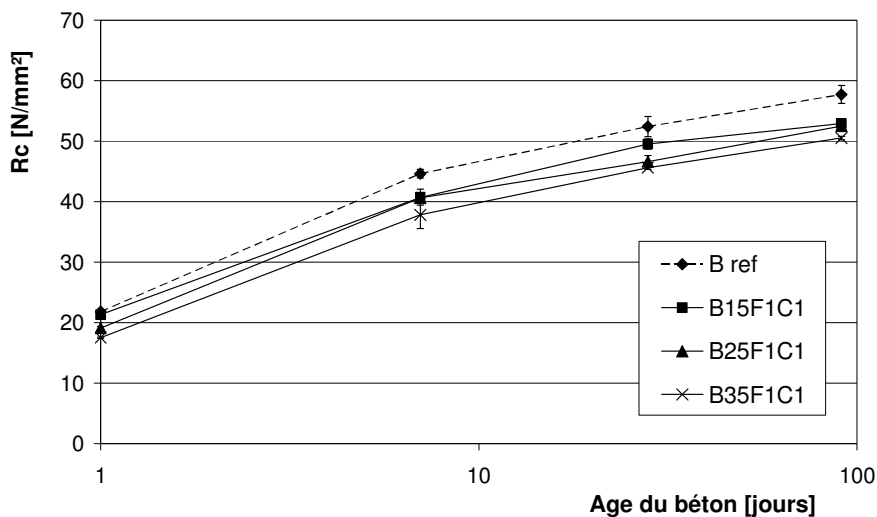


Figure 2. Influence du coefficient  $k$  sur la résistance en compression des bétons formulés avec le filler  $F_1$  et le ciment CEM I.

### 4.4 Porosité accessible à l'eau

Des essais de porosité ont été réalisés pour caractériser la contribution des fillers calcaires aux modifications de la microstructure poreuse des bétons ; la porosité accessible à l'eau étant un indicateur de durabilité d'un béton.

L'essai d'absorption par immersion consiste à mesurer la prise d'eau d'échantillons cubiques de béton ( $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ) par immersion dans l'eau selon la norme NBN B15-215:1989. La pesée des échantillons avant et après séchage en étuve ventilée à  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  permet de déduire la porosité totale accessible à l'eau des bétons. Comme on peut le voir aux Tableaux 4 et 5, les valeurs sont de l'ordre de 5% de la masse sèche de l'échantillon. Il ne semble pas y avoir d'influence des fillers sur le résultat d'essai, hormis lorsque le filler  $F_3$  est combiné au ciment de type CEM III/A. Dans ce cas, le coefficient d'absorption d'eau est significativement plus élevé que celui du béton de référence sans filler (augmentation de l'ordre de 20%).

L'essai d'absorption d'eau capillaire consiste à suivre au cours du temps la variation de poids d'éprouvettes de béton dont une face moulée ( $15 \times 15 \text{ cm}^2$ ) est posée sur une lame d'eau de 2 mm, selon

les recommandations de la norme NBN EN 13057:2002. L'absorption d'eau capillaire  $Ca_t$  [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] peut être définie pour chaque échéance de mesure  $t$  par le rapport suivant :

$$Ca_t = \frac{M_t - M_0}{A} \quad (1)$$

où  $M_0$ ,  $M_t$  et  $A$  sont respectivement la masse initiale [kg], la masse à l'échéance  $t$  [kg] et la section de l'éprouvette [ $\text{m}^2$ ]. En supposant que l'absorption d'eau par unité de surface  $Ca$  est proportionnelle à la racine carrée du temps d'immersion tant que la remontée capillaire dans l'éprouvette est libre (Hall, 1989), il est possible de calculer un coefficient de sorption  $S$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ ], défini comme le gradient de la droite de régression linéaire de l'ensemble des mesures qui se trouvent dans ce domaine. Les résultats indiquent que les coefficients de sorption des bétons additionnés sont systématiquement supérieurs à ceux des bétons de référence sans filler, en particulier lorsque le filler  $F_3$  est combiné au ciment de type CEM III/A (Tableau 5). Pour certains fillers ( $F_1$ ,  $F_4$ ,  $F_6$ ), l'absorption capillaire tend à augmenter avec le coefficient  $k$ , comme illustré à la Figure 3.

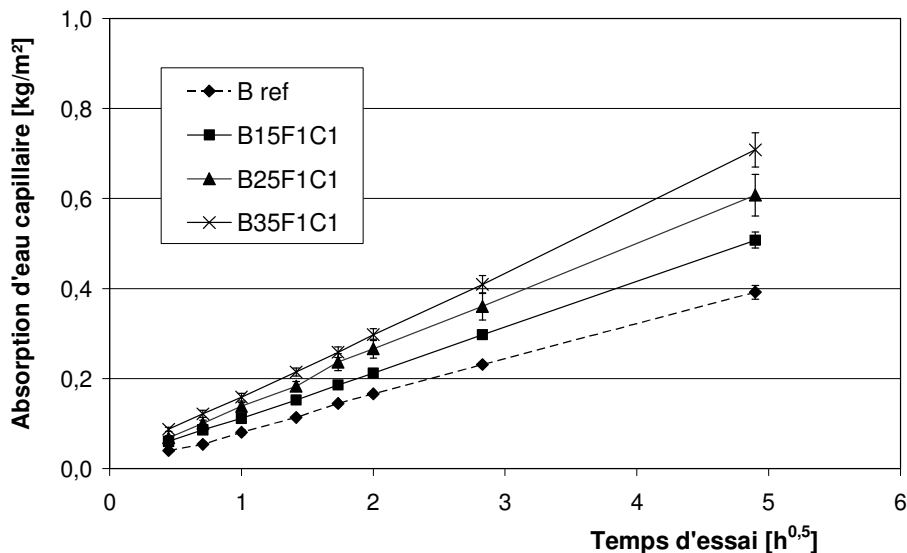


Figure 3. Absorption capillaire des bétons formulés avec le filler  $F_1$  et le ciment CEM I (cure humide).

#### 4.5 Retrait de séchage

Le retrait de séchage des bétons est mesuré sur trois prismes de dimensions  $15 \times 15 \times 30 \text{ cm}^3$  selon la norme NBN B15-216:1974, à l'aide de plots métalliques collés sur les quatre faces latérales de chaque échantillon. Les prismes sont démoulés 24 heures après leur confection, puis conservés à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $60 \pm 5\%$  HR pendant toute la période de mesures. Dans le cas des formulations à base de CEM I, une réduction significative du retrait est observée pour les bétons additionnés de filler calcaire très pur ( $F_1$  et  $F_2$ ), comme illustré à la Figure 4. La réduction s'élève à près de 20% dans le cas du filler  $F_2$ . Par contre, la réduction est très faible voire nulle avec les autres fillers (Tableau 4), ce qui peut être lié notamment à la présence de particules fines argileuses, à l'exception du filler  $F_4$ . En effet, il se peut que l'eau adsorbée par les argiles au moment du gâchage soit libérée progressivement lorsque les bétons durcis sont placés dans des conditions hygrométriques favorisant l'évaporation (Unikowsky, 1982). Le mouvement de l'eau dans les pores entraîne alors des tensions capillaires supplémentaires, responsables du retrait. Dans le cas des formulations à base de CEM III/A, les valeurs de retrait sont très semblables, excepté pour le béton avec le filler  $F_3$  pour lequel on observe une augmentation du retrait de l'ordre de 25% après 6 mois (Tableau 5).

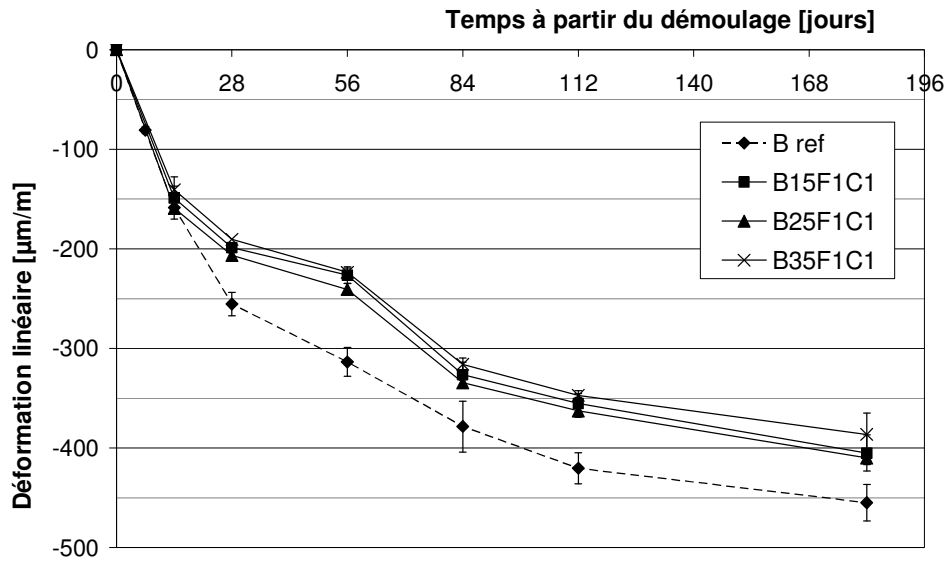
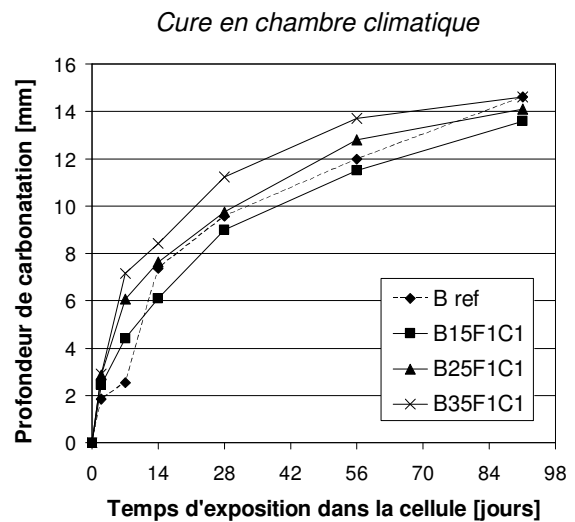
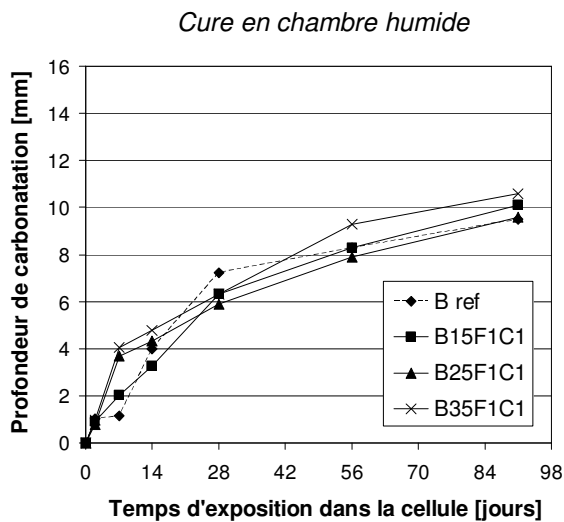


Figure 4. Influence du coefficient  $k$  sur le retrait de séchage des bétons formulés avec le filler  $F_1$  et le ciment CEM I.

#### 4.6 Résistance à la carbonatation

Les essais de carbonatation accélérée sont réalisés sur des prismes de béton ( $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$ ) entreposés dans une cellule climatisée contenant une atmosphère à 1% de  $\text{CO}_2$ . Les échantillons ont subi un traitement préalable qui consiste en un séchage en étuve ventilée à  $50 \pm 5^\circ\text{C}$  durant 14 jours, suivi d'une réhumidification en chambre climatique à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $60 \pm 5\%$  HR durant 7 jours. La profondeur de carbonatation est mesurée régulièrement en prélevant une tranche de l'échantillon par fendage et en appliquant sur la cassure une solution de phénolphtaléine, utilisée comme indicateur coloré.



Figures 5 et 6. Influence du coefficient  $k$  sur l'évolution de la profondeur de carbonatation des bétons formulés avec le filler  $F_1$  et le ciment CEM I



Les figures 5 et 6 illustrent l'évolution de la profondeur de carbonatation mesurée sur les bétons formulés avec le filler F<sub>1</sub> et le ciment de type CEM I, et ayant subi soit une cure humide (Figure 5) soit une cure en chambre climatique (Figure 6). Dans chaque cas, on observe une accélération du phénomène durant les premiers jours d'exposition pour les bétons additionnés de filler calcaire. Cette accélération semble d'autant plus importante que le coefficient k est élevé. Notons cependant que la cassure observée à 7 jours dans la courbe relative au béton de référence est inhabituelle. Les valeurs moyennes mesurées après 91 jours d'exposition sont toutefois très semblables quelle que soit la formulation (tableau 4). Elles sont comprises entre 8 et 11 mm dans le cas d'une cure humide dès le démoulage, et entre 13 et 15 mm dans le cas d'un conditionnement en chambre climatique. Les valeurs reprises au Tableau 5 indiquent qu'il n'y a pas non plus d'influence des fillers calcaires lorsque ceux-ci sont combinés à un ciment de type CEM III/A.

#### 4.7 Résistance aux sulfates

Les essais de résistance aux sulfates sont réalisés sur des prismes de mortier de dimensions 2x2x16 cm<sup>3</sup>, selon les recommandations du document hollandais « CUR-Aanbeveling 48 ». Les prismes sont démoulés 24 heures après leur confection, puis conservés sous eau à 20 ± 2°C. Après 56 jours, les prismes sont alors immergés dans une eau à haute teneur en sulfates (concentration de 16 ± 0,5 g de SO<sub>4</sub> par litre) pendant toute la période de mesures. La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) a été utilisée pour formuler les mortiers à partir des bétons étudiés. Cette méthode consiste à remplacer les granulats par une quantité de sable reproduisant la même surface granulaire (Schwartzentruber, 2000).

Le graphe de la Figure 7 montre les déformations linéaires moyennes des mortiers sur une période d'immersion de six mois en eau sulfatée. Aucune déformation significative n'est observée pour le mortier de référence sans filler MBE<sub>ref</sub>, ni pour le mortier additionné d'un filler calcaire pur (F<sub>1</sub>). Par contre, on observe un gonflement important du mortier additionné du filler F<sub>5</sub>, à partir d'une période d'immersion de trois mois. Des dégradations ont été observées en surface des échantillons. Ce résultat pourrait s'expliquer par la teneur en sulfates du filler F<sub>5</sub> (voir Tableau 2), qui dépasse largement la valeur maximale de 0,15% spécifiée dans la norme française NF P18-508 relative aux critères de conformité des additions calcaires pour béton. Les mesures de déformation sont encore en cours et devront être prolongées sur une période d'au moins douze mois. Des essais devraient être réalisés à plus faible température (5-10°C) afin d'évaluer le risque de formation de thaumasite en présence des fillers calcaires.

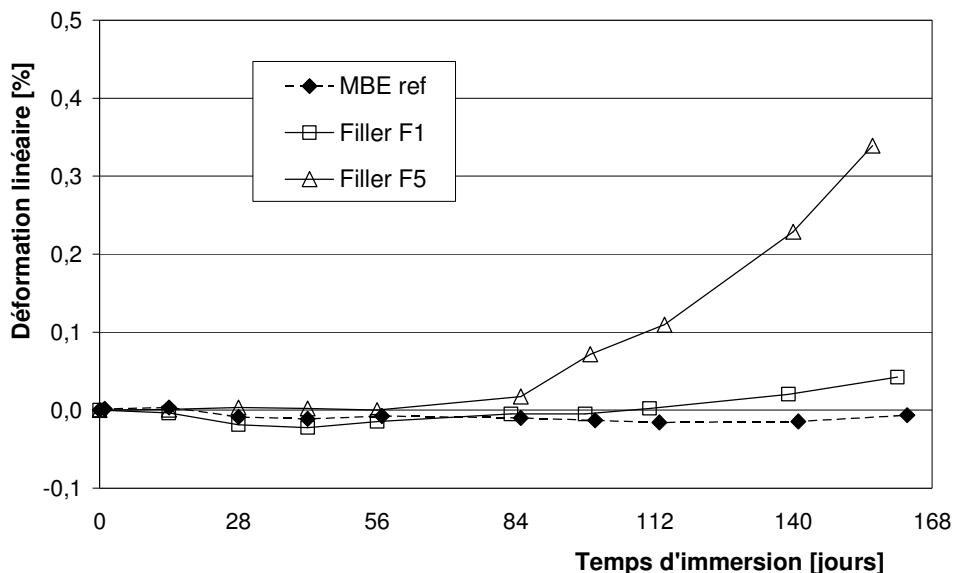


Figure 7. Influence du type de filler sur le gonflement des mortiers immergés dans une eau à haute teneur en sulfates (ciment CEM I et coefficient k de 0,25).

## 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans le cadre du projet FILLTECH, un inventaire des fillers calcaires disponibles en Région wallonne (Sud de la Belgique) a été réalisé. Suite à une première phase de caractérisation de divers lots, six fillers ont été sélectionnés pour la suite de l'étude qui consiste à évaluer les propriétés de mortiers et bétons additionnés de fillers calcaires. Le concept du coefficient  $k$ , tel que défini dans la norme européenne EN 206-1 pour les additions à caractère hydraulique et pouzzolanique, a été utilisé pour formuler les bétons. La composition du béton de référence sans filler est choisie pour satisfaire les exigences de durabilité pour une application en Belgique dans un environnement extérieur (gel et contact avec la pluie).

D'une manière générale, les résultats expérimentaux indiquent que, malgré la diminution de la teneur en ciment et l'augmentation du rapport eau/ciment des bétons additionnés de filler calcaire, des propriétés équivalentes sont obtenues en termes de résistance en compression, absorption d'eau par immersion, retrait de séchage et résistance à la carbonatation. Par contre, l'absorption d'eau capillaire est systématiquement augmentée et un gonflement important est observé avec certains fillers en cas d'immersion dans une solution à haute teneur en sulfates. Les résultats indiquent également que la contamination des fillers par des particules argileuses contribue à augmenter la demande en eau des bétons.

Un cas particulier concerne la combinaison du filler  $F_3$  et du ciment au laitier de haut-fourneau (CEM III/A) qui conduit à une augmentation relativement importante du retrait de séchage et des absorptions d'eau par immersion et par capillarité, alors que les autres propriétés des bétons ne semblent pas être affectées. Ce filler calcaire contient différents types d'impuretés comme de la silice, de l'argile et des sulfates. Des analyses complémentaires devraient permettre d'avancer une explication.

D'autres propriétés de durabilité des bétons, telles que la résistance aux cycles de gel-dégel et la diffusion des ions chlorures, sont encore en cours d'étude.

## 6. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la Direction Générale des Technologies, de la Recherche et de l'Énergie (DG TRE) de la Région wallonne pour le financement partiel du projet FILLTECH.

## 7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CEN – Comité Européen de Normalisation (2000) EN 206-1, Béton – Partie 1: spécifications, performances, production et conformité.
- Chloup-Bondant, M., Evrard, O. (1996) Propriétés chimiques et réactivité des calcites, *Mines et Carrières*, pp.54–56.
- Hall, C. (1989), Water sorptivity of mortars and concretes: a review, *Magazine of concrete Research*, vol. 41, n°147, pp.51-61.
- Meerseman, J., Descamps, P., Lucion, L., Piérard, J. et Pollet, V. (2006) Caractérisation des fillers calcaires wallons en vue de leur valorisation, *Ciments, Bétons, Plâtres et Chaux*, 882: 29-36.
- Michel, F., Piérard, J., Courard, L. et Pollet, V. (2007) Influence of physico-chemical characterization of limestone fillers on fresh and hardened mortar performances, *5<sup>th</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Gent, Belgium, pp.205-210.
- Péra, J., Huson, S. et Guilhot, B. (1999) Influence of finely ground limestone on cement hydration, *Cement and Concrete Composites*, 21: pp.99–105.
- Schwartzentruber, A. et Catherine, C. (2000) La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) – Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés, *Matériaux et Constructions*, 33: 475-482.
- Unikowsky, Z. R. (1982) *Influence des argiles sur les propriétés des mortiers de ciment*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Rapport de recherche LCPC n°110.